

doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2019.12.002

引用格式:周月,孙霁,杨四刚,等.基于机器学习的太赫兹光谱分析与识别[J].无线电工程,2019,49(12):1031-1036.[ZHOU Yue,SUN Ji,YANG Sigang,et al. Terahertz Spectral Analysis and Recognition Based on Machine Learning[J]. Radio Engineering, 2019,49(12):1031-1036.]

基于机器学习的太赫兹光谱分析与识别

周月¹, 孙霁¹, 杨四刚², 陈宏伟², 徐坤¹

(1. 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876;

2. 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要:国内对转基因作物的监管非常严格,但是对转基因作物的检测缺乏快速准确的计量方法。太赫兹时域光谱结合机器学习分类算法可以实现对转基因作物快速有效地检测识别。通过太赫兹时域光谱技术提取了2种转基因油菜种子和一种非转基因油菜种子的太赫兹吸收谱,朴素贝叶斯算法、基于朴素贝叶斯的自适应提升算法、主成分分析结合随机森林算法、主成分分析结合支持向量算法被应用于转基因油菜种子的太赫兹吸收谱的分类识别。通过实验对比,基于朴素贝叶斯的自适应提升算法获得了高达96.6%的检测准确率。该研究为运用太赫兹光谱技术手段开展转基因作物的快速检测提供方法参考。

关键词:太赫兹时域光谱;转基因油菜;机器学习;Adaboost

中图分类号: O433.4

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 1003-3106(2019)12-1031-06



Terahertz Spectral Analysis and Recognition Based on Machine Learning

ZHOU Yue¹, SUN Ji¹, YANG Sigang², CHEN Hongwei², XU Kun¹

(1. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Regulation of genetically modified crops is very strict, but the detection of genetically modified crops lacks fast and accurate measurement methods. Terahertz time-domain spectroscopy combined with machine learning classification algorithm can achieve rapid and effective detection of genetically modified crops. The terahertz absorption spectra of two transgenic rapeseeds and one non-transgenic rapeseed are extracted by terahertz time-domain spectroscopy. Naive Bayes algorithm, adaptive boosting based on Naive Bayes algorithm, principal component analysis combined with random forest algorithm, principal component analysis and support vector machine are applied to classification and recognition of the terahertz absorption spectra of transgenic rapeseeds. Experimental comparison shows that the adaptive boosting based on Naive Bayes algorithm achieves a detection accuracy of up to 96.6%. This study provides a reference for the rapid detection of genetically modified crops using terahertz spectroscopy.

Key words: terahertz time domain spectroscopy; transgenic rapeseeds; machine learning; Adaboost

0 引言

太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 是近年来逐步发展成熟的光谱分析技术, 已经逐渐成为前沿多学科交叉领域的重要技术手段之一^[1-3]。大多数的有机大分子、蛋白质分子以及生物分子在太赫兹频谱范围内具有丰富的光学信息。位于太赫兹波段范围内的光子能量很低, 可以避免生物分子结构遭到电离破坏; 另外, 太赫兹波对非极性材料具有良好的穿透

性, 为无损检测创造了有利条件。以上的优点为太赫兹时域光谱技术在生物分子的定量定性分析和无损检测领域的研究奠定了基础^[4-5]。目前, 太赫兹时域光谱检测技术已经被广泛地应用于爆炸物检测^[6-7]、毒品药品检测^[8-9]、生物医学^[10-11]、文物保护^[12]以及农作物监测^[13]等领域。

收稿日期: 2019-08-27

基金项目: 北京市科学委员会北京市科技计划基金资助项目 (Z181100008918011)

转基因技术是利用基因工程和分子生物学,通过改变生物的 DNA,进而改变生物遗传特性的技术。全球 99% 的转基因作物由美国、加拿大、阿根廷和中国种植,每年种植转基因作物的种类和数量都持续增长^[14]。这些转基因农产品被用来饲养动物或者压榨油料,减低了社会生产成本,满足了人类的生活生产需求。转基因技术在增加农作物产量,提高农作物抗病等作用的同时可能会引起过敏等危害。转基因作物带来的潜在问题,例如对环境的影响、宗教伦理的挑战以及生态安全等尚未明确。因此,针对转基因作物的检测技术的研究具有重要意义,为农产品安全和质量的检测提供重要的技术支持^[15]。

基于蛋白质检测的方法被用于大多数的转基因生物检测,但是基于蛋白质检测的方法耗时较长且成本高昂^[16]。太赫兹时域光谱检测技术结合机器学习识别方法具有快速、高效以及高准确性的优点,拥有较高的研究价值和应用潜力。2015 年, Liu 等人基于太赫兹光谱,构建了一个改进的支持向量机算法 (Support Vector Machines, SVM),可以有效地鉴定出转基因和非转基因棉花种子,为转基因作物的定性识别提供了一种无损、快速、可靠的方法^[17]。2016 年, Liu 等人利用太赫兹时域光谱成像技术对转基因稻米进行了太赫兹图像的提取。利用随机森林 (Random Forest, RF) 算法对获得的太赫兹图像进行了分类识别,准确率达到了 96.67%^[18]。2017 年, Lian 等人测量了四种转基因玉米和一种非转基因玉米标准品的太赫兹谱,随后利用主成分分析算法 (Principal Component Analysis, PCA) 对光谱数据进行了降维,然后采用 PCA 结合支持向量机的方法,成功的识别出所有标准品样本,准确率达到 92.08%^[19]。

本文以两种转基因油菜种子 (Mon88302 和 GT73) 和一种非转基因油菜种子为研究对象。首先提取了三种油菜种子的太赫兹光谱。其次通过计算得到样本的太赫兹吸收谱。最后利用朴素贝叶斯算法 (Naive Baiyes, NB)、基于朴素贝叶斯的自适应提升算法 (Naive Baiyes-AdaBoost, NB-daboost)、主成分分析结合随机森林算法 (PCA-RF)、主成分分析结合支持向量机算法 (PCA-SVM) 对样本的太赫兹吸收谱进行了分类识别,对分类效果进行了分析研究。

1 实验部分

1.1 实验系统

实验系统采用自行搭建的太赫兹时域光谱仪对样品进行太赫兹光谱提取。实验装置原理如图 1 所示。

中心波长为 1 560 nm, 重复频率为 100 MHz, 脉冲宽度为 100 fs, 平均功率为 72 mW 的飞秒光纤激光器作为太赫兹脉冲产生和探测的激励光源。飞秒光源为线偏振光, 因此, 半波片和偏振分束器的组合在分束的同时, 可以控制探测光和泵浦光的功率分配。反射镜为的反射率大于 97%。其中反射镜 4 和反射镜 5 成 90° 放置于电动位移平台上, 组成机械延迟线。斩波器为锁相放大器提供参考频率。光纤准直器负责将自由空间传输的飞秒激光耦合进入光电导天线的尾纤当中。太赫兹发射器产生的太赫兹脉冲由两组 90° 离轴抛物面镜负责进行收集和准直。两组离轴抛物面镜之间的焦点处为待测样品摆放位置。稳压电源为直流偏置 +100 V, 负责为太赫兹发射器提供直流偏压。太赫兹探测器的输出信号连接锁相放大器, 由锁相放大器进行信号处理和储存。最后通过计算机进行数据处理, 获得待测样品的太赫兹时域光谱。

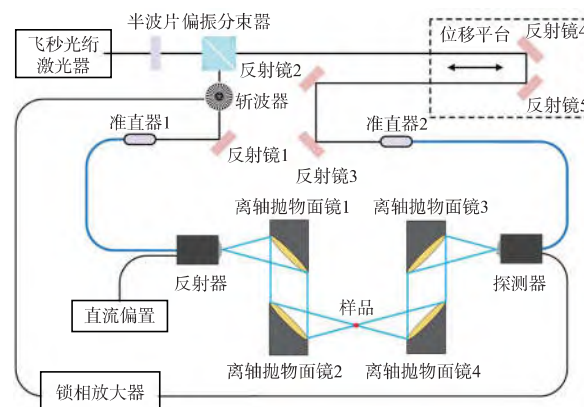


图 1 实验装置原理图

图 2 是 THz-TDS 的光谱, 其中插图是光谱仪的时域脉冲波形。

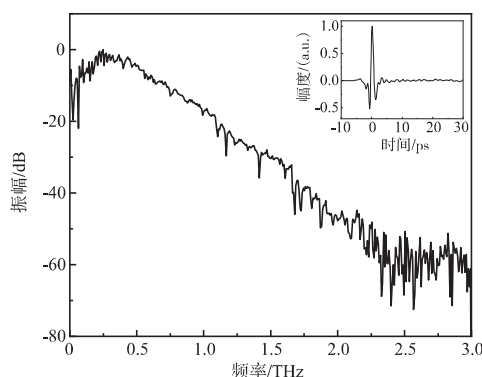


图 2 THz-TDS 光谱和时域波形 (插图)

从图2中可以看到,光谱仪有效带宽为 2.5 THz,峰值动态范围 60 dB。在实际测量过程中,室内温度保持在 23℃。样品仓中充入干燥的空气,使仓内的湿度保持在 5% 以下。减小空气中水汽对测量效果的影响。

1.2 样品制备

实验中的菜籽样品包含 3 种类别,其中 Mon88302 和 GT73 为转基因油菜种子,剩余一种 Non-GMO 为非转基因油菜种子。转基因 GT73 和 Mon88302 以及非转基因 Non-GMO 油菜种子样本均购买自孟山都公司。由于油菜种子出油率较高,难以直接压片成型。因此实验用对太赫兹吸收很小,且刻圆槽的高密度聚乙烯板作为样品的检测窗口。高密度聚乙烯板厚度 0.5 mm,圆槽直径 1 mm。将待测样品充分研磨,通过填充压实高密度聚乙烯窗口实现样品的均匀定型。整个制作过程中保持样品的干燥以减小水分对测量结果的干扰。

1.3 样品光学信息提取方法

实验采取透射式 THz-TDS 对样品的太赫兹光谱进行测量,利用 Dorney 等人提出的模型最终提取样品的太赫兹吸收谱。在正入射条件下,被测样品对于太赫兹信号的复透射函数可以表示为^[20,21]:

$$H(\omega) = \frac{E_{sam}(\omega)}{E_{ref}(\omega)} = T(\omega) e^{i\varphi(\omega)} = \frac{4\hat{n}(\omega)}{[\hat{n}(\omega) + 1]^2} \exp\left\{-i \frac{[n(\omega) - 1] \omega d}{c}\right\} \quad (1)$$

式中, $E_{sam}(\omega)$ 为放置样品后探测到的太赫兹信号; $E_{ref}(\omega)$ 为未放置样品时探测到的太赫兹信号; $T(\omega)$ 为透射率; d 为样品的厚度; $n(\omega)$ 为被测样品的折射率。样品的复折射率表示为: $\hat{n}(\omega) = n(\omega) - i\kappa(\omega)$, 其中, $\kappa(\omega)$ 为消光系数。消光系数与样品对太赫兹的吸收系数有关: $\kappa(\omega) = \alpha(\omega) c/2\omega$ 。

如果仅分析样品材料在弱吸收近似情况下,以及菲涅耳透射系数取实数时,就可以得到样品的折射率和吸收系数近似值,即^[21]:

$$n(\omega) = 1 + \frac{\varphi(\omega)c}{\omega d}, \quad (2)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln\left(\frac{(n(\omega) + 1)^2}{4n(\omega)} T(\omega)\right) \quad (3)$$

通过测量到的太赫兹时域光谱数据以及上述公式,就可以计算出样品的折射率和吸收系数。

2 实验结果与分析

2.1 样品的太赫兹吸收谱

实验提取的 3 种油菜种子的太赫兹吸收谱如图 3 所示。

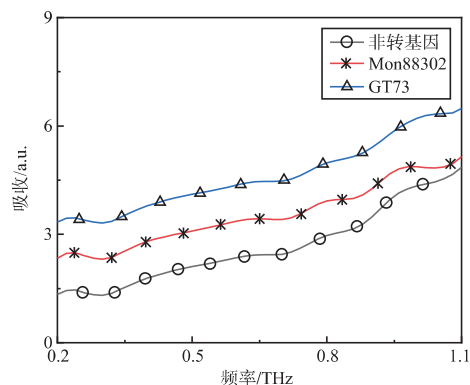


图 3 3 种油菜种子的太赫兹吸收曲线

由于油菜种子对太赫兹具有较强的吸收,因此只提取到的太赫兹吸收谱的频谱范围为 0.2~1.1 THz。从图 3 中可以发现,3 种油菜种子的并没后明显的太赫兹吸收峰。3 种油菜种子的太赫兹吸收曲线之间的差异也非常小,肉眼难以进行区分。为了达到自动化及准确的区分各类转基因油菜种子样本的目的,需要将太赫兹时域光谱与机器学习分类算法相结合。

实验中总共成功制备了 89 份样本,其中两类转基因样本分别为 30 份,非转基因样本 29 份。由于样本数量偏小,为了防止识别算法的过拟合,实验中采用 10 倍交叉验证对样品进行分析。10 倍交叉验证中,初始数据集被随机划分为大小基本相同但互不相交的 10 组数据子集。在训练和测试过程中,每次选出一组作为测试集,其余各组作为训练集,依次类推,共进行 10 次训练和测试。10 倍交叉验证中,分类准确率是 10 次迭代准确率的平均值,因此采用 10 倍交叉验证的分类结果具有较低的偏倚和方差。

2.2 朴素贝叶斯分类

贝叶斯分类器是在概率框架内进行决策的基本方法之一^[22]。在相关概率已知的理想情况下,贝叶斯分类器可以或得最优的识别标记。但是,对于后验概率,贝叶斯分类器的类条件概率很难通过有限的样本估计直接获得。朴素贝叶斯分类算法对已知类别,假设所有的属性相互独立,每个属性独立对分

类结果产生影响,从而避免了贝叶斯分类器的局限性^[23]。朴素贝叶斯分类器的表达式为:

$$h(x) = \operatorname{argmax}_c P(c) \prod_{i=1}^d P(x_i | c), \quad (4)$$

式中, x 为样本属性; d 为属性数目; c 为分类标记。

表 1 是朴素贝叶斯分类方法的转基因样本分类效果。从表 1 中可以看到非转基因油菜 Non-GMO、转基因 GT73 油菜和转基因 Mon88302 油菜的分类准确率分别为 80%、97%和 77%。各有 10%的 Non-GMO 样本被误分类为 GT73 和 Mon88302;有 3%的 GT73 被误分类为 Mon88302;有 23%的 Mon88302 被误分类为非转基因油菜 Non-GMO。Naive Baiyes 分类方法的平均准确率为 84.7%。

表 1 朴素贝叶斯算法分类效果

样本	Non-GMO	GT73	Mon88302
Non-GMO	0.80	0.10	0.10
GT73	0.00	0.97	0.03
Mon88302	0.23	0.00	0.77

2.3 基于朴素贝叶斯的 Adaboost 分类

Boosting 算法也称增强算法,可以用于分类问题和回归问题,由 Schapire 在 1990 年首次提出^[24]。Boosting 是一类通过对多个弱学习器的集成,组合成为强学习器的分类算法。1995 年, Freund 和 Schapire 通过改进 Boosting 算法,提出了自适应提升 (Adaptive Boosting, AdaBoost) 算法^[25]。AdaBoost 算法拥有较好的精度,具有很高的实用性。AdaBoost 算法的自适应表现在,前一个弱学习器预测错误的样本权重会得到加强,更新权值后,样本再次被用来训练下一轮新的弱学习器。在每轮训练过程中,样本集合用来训练新的弱学习器,产生新的权值,像这样不断地迭代循环,最终逼近预定的错误率。Ada-boost 算法的学习策略是最小化指数损失函数,当指数损失函数最小时,算法的分类错误率也逼近最小。

表 2 是基于朴素贝叶斯的 Adaboost 分类方法的转基因样本分类效果。从表 2 中可以看到 Non-GMO、GT73 和 Mon88302 的分类准确率分别为 90%、100%和 100%。各有 7%和 3%的 Non-GMO 样本被误分类为 GT73 和 Mon88302; GT73 和 Mon88302 样本没有出现分类错误;基于朴素贝叶斯的 Adaboost 分类方法的平均准确率为 96.7%。

表 2 基于朴素贝叶斯的 Adaboost 分类效果

样本	Non-GMO	GT73	Mon88302
Non-GMO	0.90	0.07	0.03
GT73	0.00	1.00	0.00
Mon88302	0.00	0.00	1.00

2.4 PCA-RF 分类

PCA 算法是一种将高维数据集简化为低维数据集的方法,属于无监督降维。高维数据集通过 PCA 可以实现有效的降维处理,降维后的数据集可以有效地反映原始数据集的数据特征。

RF 是一种综合了集成分类器和随机子空间的算法,是基于决策树的一种算法,通过集成思想将多颗决策树进行集成。决策树是一种树形结构,针对标签问题进行“分类”和“决策”,最终的决策结果就是分类结果。

表 3 展示了 PCA-RF 方法中转基因样本分类效果。从中可以看到 Non-GMO、GT73 和 Mon88302 样本的预测准确率分别为 83%、93%和 97%。PCA-RF 分类方法的平均准确率为 91%。有 17%的 Non-GMO 样本被误分类为 GT73;有 3%的 GT73 被误分类为 Non-GMO;有 3%的 GT73 被误分类为 Mon88302;有 3%的 Mon88302 被误分类为 Non-GMO。

表 3 PCA-RF 分类效果

样本	Non-GMO	GT73	Mon88302
Non-GMO	0.83	0.17	0.00
GT73	0.03	0.93	0.03
Mon88302	0.03	0.00	0.97

2.5 PCA-SVM 分类

SVM 是一种通过非线性映射将原始特征映射到较高维度的算法^[26]。SVM 在许多实践领域备受关注,如遥感、图像处理等。SVM 起源于分类问题,对于给定的训练集 D ,SVM 的思想就是找到一个划分超平面将 D 中的样本区分开。

表 4 展示了 PCA-SVM 方法的转基因样本分类效果。从中可以看到 Non-GMO、GT73 和 Mon88302 样本的预测准确率分别为 83%、100%和 70%。PCA-SVM 分类方法的平均准确率为 84.3%。有 17%的 Non-GMO 样本被误分类为 GT73;有 17%的 Mon88302 被误分类为 Non-GMO;有 13%的 Mon88302 被误分类为 GT73。

表4 PCA-SVM 分类效果

样本	Non-GMO	GT73	Mon88302
Non-GMO	0.83	0.17	0.00
GT73	0.00	1.00	0.00
Mon88302	0.17	0.13	0.70

表5对4种分类方法的分类效果进行了总结。从表5中可以看到,在转基因油菜种子的太赫兹时域光谱识别中,只使用朴素贝叶斯方法分类的准确率只有84.7%。但是结合Adaboost算法后,分类准确率达到96.7%,是4种算法中最高的分类准确率。结果表明,基于朴素贝叶斯的Adaboost算法更适合与转基因油菜种子的分类识别。

表5 4种分类方法分类效果比较

分类方法	平均 准确率	样品分类准确率		
		Non-GMO	GT73	Mon88302
朴素贝叶斯	0.847	0.80	0.97	0.77
基于朴素贝叶斯的Adaboost	0.967	0.90	1.00	1.00
PCA-RF	0.910	0.83	0.93	0.97
PCA-SVM	0.843	0.83	1.00	0.70

3 结束语

本文通过太赫兹时域光谱系统研究了2种转基因油菜种子和一种非转基因油菜种子的太赫兹时域光谱,分析了其在0.2~1.1 THz频谱范围内的太赫兹吸收谱,通过4种机器学习分类方法,对油菜种子样品进行了检测识别。实验结果表明,3种油菜种子的太赫兹吸收谱没有明显吸收峰,并且差异不大。借助于机器学习算法可以实现对其的准确分类,其中基于朴素贝叶斯的Adaboost分类算法可以达到96.7%的分类准确率。本文的研究为转基因作物快速、准确的检测提供了有益参考。



参考文献

- [1] SUKHOTIN M, BROWN E R, GOSSARD A C, et al. Photomixing and Photoconductor Measurements on ErAs/InGaAs at 1.55 μm [J]. Applied Physics Letters, 2003, 82 (18): 3116-3118.
- [2] BLANCHARD F, RAZZARI L, BANDULET H C, et al. Generation of 1.5 MicroJ Single-cycle Terahertz Pulses by Optical Rectification from a Large Aperture ZnTe Crystal [J]. Optics Express, 2007, 15 (20): 13212-13220.
- [3] LI C, ZHOU M L, DING W J, et al. Effects of laser-plasma Interactions on Terahertz Radiation from Solid Targets Irradiated by Ultrashort Intense Laser Pulses [J]. Physical Review E, 2011, 84 (3): 036405.
- [4] WALTHER M, PLOCHOCKA P, FISCHER B, et al. Collective Vibrational Modes in Biological Molecules Investigated by Terahertz Time-domain Spectroscopy [J]. Biopolymers, 2002, 67 (4 - 5): 310-313.
- [5] OGAWA Y, CHENG L, HAYASHI S, et al. Attenuated Total Reflection Spectra of Aqueous Glycine in the Terahertz Region [J]. IEICE Electron Express, 2009, 6 (2): 117-121.
- [6] LEAHY-HOPPA M R, FITCH M J, ZHENG X, et al. Wideband Terahertz Spectroscopy of Explosives [J]. Chemical Physics Letters, 2007, 434 (4): 227-230.
- [7] YAMAMOTO K, YAMAGUCHI M, MIYAMARU F, et al. Noninvasive Inspection of C-4 Explosive in Mails by Terahertz Time-Domain Spectroscopy [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43 (3): 414-417.
- [8] KAWASE K, OGAWA Y, WATANABE Y, et al. Non-destructive Terahertz Imaging of Illicit Drugs Using Spectral Fingerprints. [J]. Optics Express, 2003, 11 (20): 2549-2554.
- [9] LU M, SHEN J, LI N, et al. Detection and Identification of Illicit Drugs Using Terahertz Imaging [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100 (10): 103104.
- [10] ZAYTSEV K I, KUDRIN K G, KARASIK V E, et al. In Vivo Terahertz Spectroscopy of Pigmentary Skin Nevi: Pilot Study of Non-invasive Early Diagnosis of Dysplasia [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106 (5): 053702.
- [11] YEO W G, GUREL O, SRINIVASAN N, et al. Terahertz Imaging and Electromagnetic Model of Axon Demyelination in Alzheimers Disease [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017 (1): 1-11.
- [12] ABRAHAM E, YOUNUS A, DELAGNES J C, et al. Non-invasive Investigation of Art Paintings by Terahertz Imaging [J]. Applied Physics A, 2010, 100 (3): 585-590.
- [13] JIANG Y Y, GE H Y, LIAN F Y, et al. Application of THz Technology to Nondestructive Detection of Agricultural Product Quality [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34 (8): 2047-2052.
- [14] 陈家华. 现代食品分析新技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [15] MOREIRA I, SCARMINIO I S. Chemometric Discrimination of Genetically Modified Coffea Arabica Cultivars Using Spectroscopic and Chromatographic Fingerprints [J]. Talanta, 2013, 107: 416-422.

- [16] 潘良文, 罗达, 沈禹飞. 进口转基因油菜籽检测方法研究[C] // 中国分析测试协会科学技术奖发展回顾, 2015
- [17] LIU J, LI Z, HU F, et al. A THz Spectroscopy Nondestructive Identification Method for Transgenic Cotton Seed Based on GA-SVM[J]. Optical & Quantum Electronics, 2015, 47(2): 313-322.
- [18] LIU W, LIU C, HU X, et al. Application of Terahertz Spectroscopy Imaging for Discrimination of Transgenic Rice Seeds with Chemometrics[J]. Food Chemistry, 2016, 210: 415-421.
- [19] LIAN F, XU D, FU M, et al. Identification of Transgenic Ingredients in Maize Using Terahertz Spectra[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2017, 7(4): 378-384.
- [20] DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M. Material Parameter Estimation with Terahertz Time-domain Spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2001, 18(7): 1562-1571.
- [21] JEPSEN P U, COOKE D G, KOCH M. Terahertz Spectroscopy and Imaging-Modern Techniques and Applications[J]. Laser Photonics Reviews, 2011, 5(1): 124-166.
- [22] 周志华. 机器学习[M]. 清华大学出版社, 2016.
- [23] HAN J, KAMBER M. 数据挖掘: 概念与技术[M]. 机械工业出版社, 2012.
- [24] SCHAPIRE R E. The Strength of Weak Learnability[J]. Proceedings of the Second Annual Workshop on Computational Learning Theory, 1989, 5(2): 197-227
- [25] FREUND Y, SCHAPIRE R E. A Desicion-theoretic Generalization of on-line Learning and an Application to boosting[C] // European Conference on Computational Learning Theory, 1995: 119-139.
- [26] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector Networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273-297.

作者简介



周 月 男, (1986—), 博士, 副教授。主要研究方向: 超快光电子学及其应用。

孙 霁 男, (1986—), 博士。主要研究方向: 超快光电子学及其应用。

杨四刚 男, (1978—) 博士, 副教授。主要研究方向: 非线性光学及其应用方面的研究。

陈宏伟 男, (1979—) 博士, 教授。主要研究方向: 微波光子学、光信号处理及光纤传输。

徐 坤 男, (1973—), 博士, 教授。主要研究方向: 光电融合、射频一体化系统、神经网络与超快计算以及超快光电子学等的研究与应用。

欧洲 REASON 计划将使用卫星通信信号为远程导弹导航

据 GPS World 网站 2019 年 10 月 24 日报道, 欧洲 MBDA 导弹系统公司正在探索一种用于远程巡航导弹系统的导航解决方案, 该解决方案将使用卫星通信信号来保持射程的精确导航精度。

对于中长期飞行, 巡航导弹系统需要更多信息来支持惯性测量单元(IMU)传感器, 以达到所需的制导精度。近年来, 人们更加依赖 GPS/GNSS 信号来提供导航更新以纠正 IMU 漂移产生的误差。考虑到 GPS 或 GNSS 信号可能受到破坏或拒止, MBDA 公司希望找到一种利用卫星通信信号辅助导航的解决方案。

MBDA 公司表示, 该研究首次演示了一种卫星通信辅助的导航方案。此研究属于“弹性的和自主卫星通信导航(REASON)”计划的一部分。空客防务和太空公司与 ONERA 公司也参与了该计划的工作。

REASON 项目是英国与法国合作的“导弹创新与技术合作伙伴关系的材料和组件”(MCM IPT)计划的一部分, MBDA 公司正是该计划的牵头单位。