

国家自然科学基金面上项目 (项目编号: 61271399, 61471212, 61173184)

浙江省自然科学基金面上项目 (项目编号: LY16F010001)

支持出版

宁波市科技创新团队研究计划 (项目编号: 2011B81002)

浙江省信息与通信工程重中之重学科

稀疏表示及模糊支持向量机理论 在卫星云图处理中的应用

金 炜 符冉迪 何彩芬 闫 河 龚 飞 著



科学出版社

国家自然科学基金面上项目(项目编号:61271399,61471212,61173184)

浙江省自然科学基金面上项目(项目编号:LY6F010001)

支持出版

宁波市科技创新团队研究计划(项目编号:2011B81002)

浙江省信息与通信工程重中之重学科

稀疏表示及模糊支持向量机理论 在卫星云图处理中的应用

金 炜 符冉迪 何彩芬 闫 河 龚 飞 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从卫星云图处理的研究现状出发,运用现代信息技术与大气科学交叉互补的研究思路,介绍了稀疏表示和模糊支持向量机理论及其在卫星云图处理中的若干应用。书中采用不确定性理论及机器学习法,开展了卫星云图降噪、多通道云图融合、卫星云图超分辨率、云类识别、云图检索等方面的研究,以期提高气象业务服务水平,并拓展稀疏表示理论及FSVM的实际应用价值。本书每章都给出了相应的实验方法和实验结果,希望能给读者带来更多的参考价值。

本书可作为从事信号与信息处理、图像处理、模式识别、遥感信息处理、大气科学等方面研究工作的科技人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

稀疏表示及模糊支持向量机在卫星云图处理中的应用/金炜等著. —北京:科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-048391-1

I. ①稀… II. ①金… III. ①卫星云图分析 IV. ①P455

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 117168 号

责任编辑: 杨 岭 黄明冀 / 责任校对: 杨悦蕾

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016年6月第一次印刷 印张: 9 3/4

字数: 200千字

定价: 86.00元

前 言

我国是气象灾害种类最多、发生最频繁、影响最严重的国家之一，气象灾害不仅造成了重大的经济损失，同时也造成了严重的人员伤亡。在当前和今后一个时期，在全球气候变化背景下，极端天气事件发生的概率进一步增大；降水分布不均衡、气温变化异常等因素导致的洪涝、干旱、高温热浪、低温雨雪冰冻、森林草原火灾、农林病虫害等灾害增多，出现超强台风、强台风、风暴潮等灾害的可能性进一步加大。

防灾胜于救灾，要减少气象灾害的威胁，除了进行相关预防性准备外，对灾害的预警也提出了新的需求。气象卫星由于具有观测区域大、探测重复期短、实时性强等突出优点，所获取的卫星云图在气象业务保障、短中长期天气预报、气候分析和预测、强对流云团的识别与跟踪等方面已得到广泛应用，成为动态监测各类突发灾害性天气的有力工具。然而，现阶段人工目视判读仍是卫星云图分析的主要方法之一，这既易受主观因素的影响，又有碍于天气预报制作的科学化、自动化与量化的发展趋势。随着气象卫星探测能力的不断提高和数值预报技术的发展，云图信息的应用将越来越广泛，采用信息处理的先进理论与算法，开展卫星云图处理的研究将有利于建立完善的天气预警系统，从而增强预警的准确性，这也是国家经济建设和社会发展的迫切需要，具有特别重要的意义。

近年来，随着压缩感知技术在信号处理、成像等领域的成功应用，稀疏表示理论受到了各国学者的广泛关注。研究表明，视觉皮层 V1 区细胞对外侧膝状体 (lateral geniculate nucleus, LGN) 细胞所发放的输出信息的特征表达存在超定性质，即它的编码表达空间维数大于其输入空间维数，因此稀疏表示符合灵长类动物大脑视觉皮层对复杂刺激的感知过程，可作为神经信息群体分布式表达的有效策略，更加符合人眼的视觉特性，正是由于稀疏表示所具有的特征保持性和稀疏性，以冗余字典为代表的稀疏表示理论被成功应用于信号处理的多个领域，为云图处理提供了新工具。同时，卫星云图作为一类特殊信号，除了特征明显的典型云类外，还存在云类过渡区域和处于长、消阶段等一些特征较为模糊的云系及混合云系；而且云图的形成受到诸如噪声、大气湍流、地表形态起伏、卫星轨道漂

移等的影响,因此云图不可避免地具有模糊、不均匀、云型复杂多变等特点,这就使云图的处理具有一定的特殊性,也造成了云图处理的困难。模糊支持向量机(fuzzy support vector machines, FSVM)建立在统计学习 VC 维理论和结构风险最小原理基础上,能根据有限的样本信息在模型的复杂性和学习能力之间寻求最佳折中,从而可以获得较好的推广能力,而且由于引入了模糊隶属度,使得 FSVM 对噪声与野值样本不敏感,具备模糊处理能力,这正吻合了卫星云图的特点。

本书根据经济发展对气象服务提出的要求,从卫星云图的本质特性出发,运用现代信息技术与大气科学交叉互补的研究思路,将稀疏表示思想引入卫星云图处理,并针对卫星云图的模糊性,采用不确定性理论及机器学习法,开展了卫星云图降噪、多通道云图融合、卫星云图超分辨率、云类识别、云图检索等方面的研究,以期提高气象业务服务水平,并拓展稀疏表示理论及 FSVM 的实际应用价值。

本书在出版过程中,得到了科学出版社的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢。同时还要感谢国家自然科学基金面上项目(面向卫星云图纹理分析的对偶树轮廓波及模糊 SVM 理论与算法研究,项目编号:61271399;红外云图超分辨率的稀疏表示理论与算法研究,项目编号:61471212;移不变抗混叠多尺度几何分析基础理论研究,项目编号:61173184)、浙江省自然科学基金面上项目(基于稀疏表示服务海洋经济的卫星云图检索研究,项目编号:LY16F010001)、浙江省信息与通信工程重中之重学科对本书出版的资助。

本书是我们在该领域工作的小结,感谢宁波大学信息科学与工程学院对我们工作的支持,感谢实验室同仁多年来的努力工作,感谢王雷、何艳、范亚会、石大维、王文龙、田文哲、周峰、贾长斌、颜文、周颖、龚飞等人所付出的辛勤劳动。由于本书引用的参考文献较多,难以一一列出,在此向原作者致敬。

鉴于作者学识水平和视野所限,加之本书成书时间仓促,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 卫星云图处理的研究现状	2
1.3 静止气象卫星及其卫星云图	5
1.3.1 静止气象卫星	5
1.3.2 卫星云图相关知识	6
1.4 卫星云图处理的理论准备：稀疏表示及模糊支持向量机理论	8
1.4.1 稀疏表示理论	8
1.4.2 支持向量机相关理论	14
1.5 本章小结	24
参考文献	25
第 2 章 卫星云图预处理	28
2.1 基于稀疏表示的卫星云图降噪算法	28
2.1.1 卫星云图稀疏降噪模型	29
2.1.2 适用于云图降噪的过完备字典 D 的构造	30
2.1.3 算法步骤	31
2.1.4 实验结果与分析	32
2.2 联合块匹配与稀疏表示的卫星云图修复	33
2.2.1 基于块匹配的图像修复	35
2.2.2 云图稀疏修复模型的建立	37
2.2.3 算法步骤	39
2.2.4 实验结果及讨论	39
2.3 抗混叠轮廓波域采用压缩感知的云图融合方法	43
2.3.1 AFCT 的构造	44
2.3.2 压缩感知(CS)理论	46
2.3.3 结合 AFCT 及 CS 的气象云图融合实现	47

2.3.4 实验结果及分析	49
2.4 基于过完备字典稀疏表示的云图超分辨率	52
2.4.1 算法基本原理	53
2.4.2 过完备字典对的联合训练	53
2.4.3 基于稀疏表示的云图超分辨率实现	55
2.4.4 实验结果与分析	56
2.5 本章小结	58
参考文献	59
第3章 卫星云图压缩感知	62
3.1 引言	62
3.2 适合云图稀疏表示的 Tetrolet 变换	63
3.3 云图的时空相关性及压缩感知	66
3.3.1 云图的时空相关性	66
3.3.2 基于时空相关性的云图压缩感知	67
3.4 实验结果与分析	69
3.5 本章小结	73
参考文献	73
第4章 利用密度聚类支持向量机的卫星云图云检测	75
4.1 引言	75
4.2 资料分析及特征提取	76
4.2.1 资料分析	76
4.2.2 特征提取	77
4.3 密度聚类支持向量机	77
4.3.1 DBSCAN 算法	78
4.3.2 样本集的纯度	78
4.3.3 样本集的充足度	79
4.4 实验结果与分析	80
4.5 本章小结	81
参考文献	82
第5章 适用于卫星云图云类识别的稀疏分类器构造	83
5.1 当前云分类研究现状	83
5.2 过完备字典稀疏表示的卫星云图云分类方法	86
5.2.1 卫星云图云分类体系	86
5.2.2 适合卫星云图特征表达的过完备字典	87

5.2.3 字典特征的提取	89
5.2.4 基于重构残差的稀疏分类器	90
5.2.5 采用子空间投影的稀疏分类器	91
5.3 实验结果与分析	93
5.3.1 CCSI-ODSRF 分类器的准确率	94
5.3.2 多种分类器的对比	95
5.4 本章小结	97
参考文献	97
第 6 章 采用多模糊支持向量机决策融合的积雨云检测	99
6.1 积雨云检测的研究现状	99
6.2 积雨云及其特征提取	100
6.3 决策融合	103
6.3.1 模糊支持向量机(FSVM)及其输出模糊概率的拟合	103
6.3.2 加权系数决策融合	104
6.4 实验及结果分析	105
6.5 本章小结	108
参考文献	108
第 7 章 面向卫星云图云类识别的自适应模糊支持向量机	110
7.1 引言	110
7.2 基于支持向量机的卫星云图云类识别研究现状	110
7.3 卫星云图云分类体系及特征提取	111
7.4 自适应模糊支持向量机	112
7.4.1 自适应模糊隶属度函数的设计	114
7.4.2 确定自适应参数	114
7.5 云分类算法流程	117
7.6 实验结果及分析	118
7.7 本章小结	121
参考文献	122
第 8 章 基于稀疏表示的卫星云图检索	123
8.1 适应于云图检索的特征提取及云图检索评价准则	123
8.1.1 云图灰度特征提取	124
8.1.2 基于均匀局部二元模式的云图纹理特征提取	125
8.1.3 云图形状特征提取	129
8.1.4 云图检索性能评价准则	134

8.2 基于稀疏表示的云图检索的实现	135
8.2.1 采用字典学习的云图特征优化	135
8.2.2 基于稀疏分类的云图检索算法	137
8.3 实验结果与分析	139
8.4 本章小结	143
参考文献	144
索引	145

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

地球上空约 $1/2$ 的区域被云覆盖。一定的天气现象总是和云的某种形态有所联系,云通过地球-大气辐射系统影响全球的能量交换,进而影响能量所驱动的气候因素^[1]。从古至今,人类一直通过观测云的形态预测当地的天气。随着人类活动范围的日益扩大,大范围、多角度地对云进行观测就显得尤为重要。气象卫星云图以其较广的观测范围、较短的探测周期等优点,有利于长期把握大气、海洋、云况等信息,对掌控天气变化的趋势具有重要意义。此外,在一些自然灾害,如台风、洪涝、雪灾、林火等的预防工作中,卫星云图也得到了广泛的应用。

然而,现阶段人工目视判读仍是卫星云图处理的主要方法之一,这既易受主观因素(如心理状态、认知取向、思维定势、判读经验等)的影响,又有碍于天气预报制作的科学化、自动化与定量化的发展趋势。随着气象卫星探测能力的不断提高和数值预报技术的发展,云图信息的应用将越来越广泛,对云图处理进行更加深入的研究具有特别重要的意义。随着气象卫星技术的发展,各资料站每天能够接收几乎覆盖全球的 GB 数量级的海量云图数据,传统的云图人工处理方法更显得捉襟见肘,如何将最新的信息处理技术引入卫星云图处理领域,引起了大批气象卫星工作者的研究兴趣。面对海量的卫星云图,我们需要用尽量少的系数来捕获尽可能多的云图信息,这恰好与稀疏表示理论的核心相吻合。此外,稀疏表示理论能够在一定程度上模拟人类视觉系统感知外界信息的机理。因此,探索一种可以高效准确提取卫星云图的本质内在特征,实现对卫星云图内容的最稀疏解析,为提高当前卫星云图的处理水平提供了一种可行的新思路。

卫星云图处理主要包括云图预处理、云图特征提取及由此发展起来的云的识别分类及检索等问题。由于云的复杂性,除特征明显的典型云类外,还存在云类过渡区域和处于长、消阶段等一些特征较为模糊的云系及多层云系;而且云图的形成受到诸如噪声、大气湍流、地表形态起伏、卫星轨道漂移等的影响,因此云

图不可避免地具有模糊、不均匀、云型复杂多变等特点,这就使得云图的处理具有一定的特殊性,也造成了云图处理的困难。

近年来,我们根据经济发展对气象服务提出的要求,从卫星云图的本质特性出发,运用现代信息技术与大气科学交叉互补的研究思路,将稀疏表示思想引入卫星云图处理,并针对卫星云图的模糊性,采用不确定性理论及机器学习法,开展了关于卫星云图降噪、多通道云图融合、卫星云图超分辨率、云类识别、云图检索等方面的研究,以期提高气象业务服务水平,并拓展稀疏表示理论及模糊支持向量机的实际应用价值。

1.2 卫星云图处理的研究现状

随着气象卫星技术的发展,气象人员开始广泛使用卫星云图资料,并对其进行了充分的分析和研究,从人工目视对云图形态进行分析,到结合类型丰富的其他气象资料的分析与研究;从气象专业人员主观判断目标云体类型,到基于云体自身特征进行智能识别的研究。归纳起来,针对卫星云图的应用研究,主要集中在以下几个方面。

(1)卫星云图的降噪处理。原始气象卫星云图在成像和传输过程中,一些人为不可控的因素导致云图中不可避免地存在各种噪声,而噪声的存在严重制约了云图内容的解读。因此,对云图进行分析和处理前,必须对云图进行降噪处理。当前,卫星云图噪声抑制的方法基本在空间域和变换域中进行。空间域方法采用各类平滑函数对卫星云图执行卷积操作,以达到降噪的目的,典型的空间域滤波方法有中值滤波、邻域均值滤波、几何均值滤波、Gradient-inverse 滤波等。受制于这些滤波方法的机制,在降噪的同时,也损失了云图中细微的影纹及云团的边缘特征。为弱化空间域滤波的负面影响,上官伟等采用局部统计滤波和改进的中值滤波^[2]降低云图噪声。变换域滤波方法主要是将原始云图信号进行某种空间变换,使得图像信号和噪声信号在变换后的空间中易于区分。通过分析噪声信号在新空间中的表现形式,选择合适的方式降噪。比如,通过傅里叶变换或 DCT 变换,得到云图噪声的频率范围,选择合适的频域滤波器执行滤波操作,也可在此基础上,结合小波变换,设计基于小波域的组合滤波方法^[3]。

(2)多通道卫星云图的融合。气象卫星通常具有多个成像波段不同的探测器,所成图像能够从不同角度反映天气信息。比如,红外通道的波长范围为 $10.3\sim 11.3\mu\text{m}$,该通道通过接收红外辐射成像,图像的灰度值取决于云顶或地表温度,而可见光通道的波长范围为 $0.55\sim 0.9\mu\text{m}$,该通道通过接收云体或地表反射的太

阳辐射成像,图像的灰度值取决于云体或地表的反射率。经过图像融合技术的处理,不仅能够在单幅云图中包含不同通道的云图特征,而且融合后的云图含有更丰富的内容,这有利于开展云图智能分析,如台风云系定位、云团类型识别等,从而能够高效准确地分析云图。因此,国内外许多学者针对多通道的云图融合问题进行了研究。Ye等^[4]基于小波变换对红外通道和可见光通道云图进行融合,该方法不仅可以融合分辨率不同的云图,而且融合云图的方向、区域等细节信息更为丰富。美国海军实验室基于微可见光和红外云图的伪彩色融合方法,使融合后的云图很容易从色调上区分晨昏时的云和雾^[5]。杨贵军等^[6]基于神经网络的红外云图和可见光云图的融合方法,能够快速获得具有高分辨率地表温度分布的融合图像。符冉迪等^[7]利用压缩感知融合多通道云图,融合后的云图与常规融合算法相比具有更高的清晰度。

(3)卫星云图超分辨率。目前,气象卫星虽能提供相当多的成像通道,但不同通道数据的分辨率往往不同。比如,由于受接收辐射的波长和技术水平的限制,红外通道数据的分辨率往往较低,这对综合使用多通道数据进行分析不利,也会增加分析设计的难度^[8,9];如果对高分辨率通道的数据进行抽样,使其与低分辨率通道的数据一致,则对宝贵的高精度数据信息是一种浪费。因此,设计相应的超分辨率算法,使得低分辨率通道数据的精度得以提升就有着极大的现实意义和应用价值。自20世纪60年代Harris提出超分辨率思想以来,超分辨率技术得到了学术界的广泛重视,出现了一些行之有效的算法,并在遥感图像处理中得到了应用^[10]。然而,目前的遥感图像超分辨率算法大都未考虑卫星云图纹理结构的复杂性及不规则性,仅适用于特定的成像模型。如传统的插值放大算法本质上并不能增加图像的有效信息,且随着放大倍数的增加,在图像的边缘区域会出现严重的振铃或棋盘现象;基于重构约束的算法,根据假设的成像模型,通过多帧或单帧低分辨率图像的逆向求解,复原出高分辨率图像,但由于此类反问题严重的病态性,往往不易得到稳定的结果;Chang等从流形学习理论出发,认为低分辨率图像空间与高分辨率图像空间具有相似的流形,提出一种称为邻域嵌入(neighbor embedding, NE)的超分辨率算法^[11],该算法通过训练样本建立低分辨率图像块与高分辨率图像块的映射关系,并根据相邻低分辨率图像块的线性组合来预测对应的高分辨率图像块,但该算法计算复杂性较高,且所得的高分辨率图像往往过于平滑。

(4)云团类型的判定。不同的云层能够反映不同的天气状况,如积雨云往往预示着雷暴、降水等强对流天气,这种天气通常给人类的生产、生活带来严重影响;层积云通常不会带来强对流天气。因此正确判断云的类别就显得特别重要。气象卫星技术发展的初期,气象人员主要通过人眼目视判别云的类别。20世纪

90 年代,伴随着模式识别技术的发展,气象人员开始着眼于云团类型自动识别的研究。Bankert^[12]提出一种基于三层神经网络的云分类算法,之后和 Aha 合作优化神经网络的训练过程,识别的准确率得到了进一步的提高^[13]。Romanatahn 等^[14]从大气物理学角度入手,深入研究了不同类别云层吸收太阳辐射的差异,计算出各类云层吸收的能量的统计特征,如透光率、吸收率、反照率等,进而判断云的类别。国内学者也在云类自动识别领域进行了深入研究。杨澄等^[15]将反演后的红外云图和水汽云图的亮温作为特征,对不同类别云团的性质进行了研究。王继光等^[16]基于 SOFM、结合 PNN 实现了云的分类。

(5)卫星云图检索。包含丰富天气信息的卫星云图被广泛应用于日常天气预报业务,特别是在海洋环境,因为往往缺乏常规观测资料,只能从空中对云进行观测,卫星云图就成为提供气象服务最主要的手段。由于长期积累,气象云图资料已经具备一定规模,在管理和利用方面都出现了困难,怎样克服这一困难以更好地为海洋经济服务是一个值得关注的问题,传统的数据库技术无法满足海量云图检索的需求,必须引入基于内容的图像检索技术 CBIR(content-based image retrieval)。CBIR 技术出现在 20 世纪 90 年代,与基于文本的图像检索技术不同的是, CBIR 不需要人工标注关键字,可通过图像特征与数据库图像特征的距离比较,找到相似图像^[17,18]。基于内容的图像检索技术一经提出,便成为了研究热点,各高校、公司、科研机构纷纷加入,如 IBM、Virage、MIT 媒体实验室等都对该技术进行了深入研究,并推出了自己的 CBIR 系统^[19,20]。近年来,国内各大高校和科研机构也开始对基于内容的图像检索系统展开研究^[21,22],如浙江大学的 Webscope CBR 多媒体检索系统,中国科学院计算机研究所开发的 MIRES 检索系统等。然而,传统的图像检索技术主要针对一般的自然图像,很难适应卫星云图检索的需要。比如卫星云图纹理细节丰富,其中对流性较强的积云常富含褶皱及斑点纹理,红外云图中的层云纹理结构光滑,卷云呈纤维状纹理,而积雨云往往在云顶最高处,呈现团状纹理等,同时对于台风云系具有自身的云团形状特征,如何有效地对云图特征进行理解和描述,已成为卫星云图检索的关键所在。目前,基于内容的卫星云图检索系统的研究还处在起步阶段,国内外尚未形成系统的卫星云图检索方案。日本通过提取台风云系的形状特征和运动轨迹特征,设计了一种面向台风云图的检索系统 Kitamoto^[23],但系统只能针对台风云系,不具有一般性;意大利的 Acqua 等利用点扩散技术,通过位置、旋转度和尺度来刻画云图的形状特征,研究了针对飓风与非飓风云系的检索系统,该系统同样存在应用面较窄的问题。印度的 Deepak 利用灰度共生矩阵提取了云系的纹理特征^[24],并将云团的面积和周长作为形状特征,实现了一个云图检索系统,但实验表明,该类特征也仅对台风云系适应性较好。在国内,天津大学的刘正光^[25]

通过云图分割提取了云系的轮廓、骨架、周长、面积及云系的纹理特征,建立了卫星云图数据库,但对于特征的综合表达能力及匹配算法等尚待改进;哈尔滨工程大学的上官伟^[26]利用小波、统计等方式提取了云图频谱特性及结构特性,通过模糊相似度计算,实现了一种云图检索系统,但系统的检索精度及检索效率有待进一步提高;南京航空航天大学融合粒子群优化算法和FCM算法,首先对云系进行前期聚类,再利用灰度共生矩阵提取纹理特征,并结合灰度及形状特征,进行相似度匹配,实现云图检索^[27],但当该方法面对复杂云系时,难以提取全面的形状特征,并且相似度匹配也不易实现。

综上所述,卫星云图的出现一定程度上促进了气象科学研究技术的发展,但当前的卫星云图的应用研究也存在一些不足之处,比如在云类识别应用中就存在以下困难:首先,难以区分特征相似的目标区域,如陆地积雪和云;其次,在云层较薄的情况下,地表、云顶等不同目标的特征会同时出现在同一块区域中,从而影响了对该区域的分析解读;而且,传统的卫星云图分析通常是气象专家结合自身的专业素养目视判别,主观因素较大,效率低下。

1.3 静止气象卫星及其卫星云图

气象卫星是一个在空间飞行的平台,可用于携带多种气象观测仪器,通过气象卫星获取的卫星云图可以综合反映大气中进行的动力和热力现象,是进行天气预报、气候监测和自然灾害预防十分重要的工具。卫星按照其运行的轨道,基本上分为极轨卫星和静止卫星,其中静止卫星由于观测范围广、观测频次高,是当前气象观测的重要手段。

1.3.1 静止气象卫星

静止卫星又称为地球同步卫星,是以与地球自转相同的速度,在东西方向绕着地球赤道运行,相对静止于地球赤道上某点上空的卫星,具有时间分辨率高、观测范围大等优点。目前我国FY-2系列及日本MTSAT卫星可用于我国各地区的气象业务,两种卫星均有4个红外通道(infrared radiation, IR)和1个可见光通道(visual, VIS),其中红外通道包括长波红外通道(IR1)、红外分裂窗通道(IR2)、水汽通道(IR3)和中波红外通道(IR4)。两种卫星的对比信息如表1.1所示^[28,29]。

表 1.1 FY-2 卫星与 MTSAT 卫星信息对比

对比项	FY-2	MTSAT
高度/km	35860	35800
星下点中心位置	(105°E, 0°N)	(140°E, 0°N)
5 通道波段/ μm	红外 1	10.3~11.3
	红外 2	11.5~12.5
	红外 3	6.3~7.6
	红外 4	3.5~4.0
	可见光	0.55~0.90
量化等级/bit	红外	10
	可见光	10
星下分辨率/km	红外	5
	可见光	1.25

1.3.2 卫星云图相关知识

气象卫星通过辐射扫描仪接收来自地面、云层和大气反射的太阳辐射或自身发射的红外辐射，并将这些辐射信息以图像的形式呈现出来，形成卫星云图，其中最常用的通过静止卫星获取的云图包括红外云图、水汽云图和可见光云图。

(1)红外云图。红外云图是卫星在某一特定波段所接收到目标物发出的辐射所形成的图像，一般包括三个红外通道(IR1、IR2、IR4)，如图 1.1(a)~(c)所示，主要取决于物体自身的温度和发射率。在红外云图中，物体的温度与云图色调呈反比关系，色调亮的地方表示温度低，色调暗的地方表示温度高。通常情况下，大气温度随高度的增高而降低，所以可通过红外云图的色调判断云系的高度，色调越亮，表示云顶温度越低，云顶越高。陆地和海洋的温度反差比较明显，所以海岸线在红外云图中较为清晰。同时，在红外云图中一般最暗的区域为陆地，其次是海洋、湖泊等水体，温度较低的云系呈现白色或亮灰色。

(2)水汽云图。水汽云图是卫星接收来自大气水汽层发出的辐射而生成的图像，是红外谱段图像中比较特殊的一种(IR3)，如图 1.1(d)所示。它表示大气中水汽含量的多少，反映位于不同发射层的水汽特征，在云图中仍表现为温度特征。卫星测量的辐射越小，表示水汽含量越多，在水汽云图中色调越白；卫星测量的辐射越大，表示水汽含量越少，在水汽云图中色调就越暗。在中高云区，辐射主要来自云层，所以云系形态在红外云图和水汽云图中较为相像，而在少云地

区，对流层中上部的云系特点可在水汽云图中显现，而在红外云图中则无法明显看出。

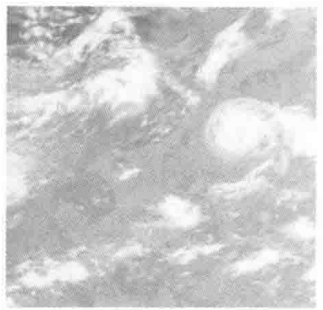
(3)可见光云图。可见光云图是扫描辐射仪在可见光谱段测量来自云层与地面反射的太阳辐射所呈现的图像，如图 1.1(e)所示。接收到的辐射越大，在云图中的色调越亮，反之，越暗。物体反射太阳辐射的强度由两方面决定：一是物体自身的反照率，反照率越大，色调越亮；二是太阳高度角，高度角越大，光照越充分，反射的太阳辐射越强，色调越亮。例如，早晨、傍晚的时候，太阳高度角很低，可见光云图非常灰暗；夜晚的时候，则无法获取有效的可见光云图。



(a)IR1 云图



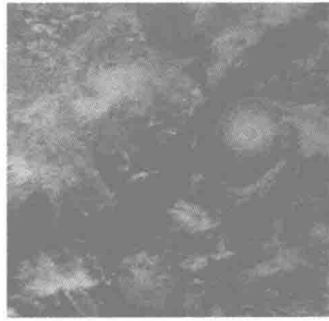
(b)IR2 云图



(c)IR4 云图



(d)IR3 云图



(e)VIS 云图

图 1.1 五通道云图

可见光云图可用于区分海洋、陆地和云。海洋反照率较大，在云图中色调偏暗，陆地的反照率大于海洋，小于云系，所以在云图中，陆地的色调亮于海洋，而暗于云。无积雪覆盖的地面，通常情况下云的反照率高于陆地，所以在可见光云图中云表现为白色或亮灰色。不同的云系具有不同的反照率，厚度大、水冰含量高的云系反照率较高；厚度小、水冰含量低的云系则反照率较低。同时，由于太阳高度角原因，会在云图中形成阴影和高亮区，这有助于识别云的纹理结构信息。

1.4 卫星云图处理的理论准备：稀疏表示及模糊支持向量机理论

1.4.1 稀疏表示理论

在数字图像处理技术中，一个根本性的问题就是如何建立有效的图像表示方式。在很大程度上，图像表示方式的进步促进了图像处理技术的发展。图像的稀疏表示作为一种新颖的图像表达方式，能够用一组尽可能稀疏的系数表示原图像，系数中的非零成分象征着图像信号的本质特征和主体结构，并且冗余系统对噪声具有更强的鲁棒性。而且神经生理学研究证明，哺乳生物的视觉皮层的编码方式也属于稀疏编码的范畴，从这个层面来讲，稀疏表示模型能高效地匹配哺乳生物的视觉感知特性。所以，稀疏表示理论不仅对数字图像处理产生了极大的影响，而且促进了模式识别、逼近论、机器学习^[30]等领域的发展。

1. 稀疏表示理论的发展

图像的稀疏表示方法自傅里叶变换提出以来，主要经历了以下几个阶段：

(1)小波变换。该变换具有很多优于傅里叶变换的特性，如良好的空间/频率局部化特性，但却并不具备人眼的方向敏感特性，主要适合表示一维奇异性的对象，无法有效地表示、处理图像的高维数据。

(2)多尺度几何分析(multiscale geometric analysis, MGA)^[31]。MGA 克服了小波变换的方向性缺乏问题，它能实现高维空间数据的高效表示，为图像的稀疏表示提供了更有效的工具。MGA 自提出以来，被广泛地应用于数学分析、统计分析、模式识别、计算机视觉等学科领域，且在图像分析中也取得了较大成功。由于目前所提的 MGA 工具主要以变换为核心，因此也称其为多尺度多方向变换。图像的 MGA 分为非自适应多尺度几何变换和自适应多尺度几何变换。非自适应多尺度几何变换目前主要包括 Ridgelet、Curvelet、Contourlet 变换等；自适应多尺度几何变换目前主要包括 Brushlet、Wedgelet、Bandelet、Directionlet、Tetrolet 变换等。目前，图像的 MGA 正处于发展阶段，对其理论及应用的研究是目前国内图像稀疏表示研究的一个重要方面。

(3)过完备字典图像稀疏表示。作为又一新的研究热点，过完备字典图像稀疏表示近年来受到了国内外学者的关注，早在 1989 年，Mallat 就提出了采用过