

**COMPRESSIVE SENSING BASED RAMAN SPECTRAL IMAGING
FOR EXPLOSIVE DETECTION**

SUDHABRATA MAJUMDER



CENTRE FOR SENSORS, INSTRUMENTATION AND CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2025

© **Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2025**

**COMPRESSIVE SENSING BASED RAMAN SPECTRAL IMAGING
FOR EXPLOSIVE DETECTION**

by

SUDHABRATA MAJUMDER

CENTRE FOR SENSORS, INSTRUMENTATION AND CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

ENGINEERING

Submitted

in fulfilment of requirements for the degree of Doctor of Philosophy



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

APRIL 2025

Certificate

This is to certify that the thesis entitled “**Compressive Sensing based Raman Spectral Imaging for Explosives Detection**”, being submitted by **Mr Sudhabrata Majumder** to the **Indian Institute of Technology Delhi** for the award of the prestigious degree of “**Doctor of Philosophy**”, is a record of the authentic research work carried out by him under our supervision and guidance. To the best of our knowledge, he has fulfilled all the requirements for submission of this thesis, which has reached the required standard.

The material in this thesis has not been submitted in part or whole to any other University or Institute for the award of any other degree.



Dr. Sakshi Gupta

Scientist
Instruments Research & Development Establishment (IRDE)
Vigyan Vihar, Raipur, Dehradun,
Uttarakhand 248001
India

Dr. Satish Kumar Dubey

Associate Professor
Centre for Sensors, Instrumentation and Cyber Physical System Engineering (SeNSE)
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi 110016
India

Acknowledgement

I want to extend my heartfelt thanks to the many people who encouraged and assisted me throughout this journey. First and foremost, I am deeply grateful to my thesis advisor, Prof. Satish Kumar Dubey and Dr. Sakshi Gupta, for allowing me to work under their supervision. Their guidance, support and encouragement gave me the confidence to pursue new research ideas, and they were always there with the right advice when I needed it most.

I sincerely thank my student research committee members, Prof. Dalip Singh Mehta, Prof. Kedar Khare, and Prof. Gufran Sayeed Khan, for their constant cooperation, guidance, and suggestions throughout my research. I am also thankful to Dr. Ajay Kumar, Director of IRDE, for his advice and support at IRDE.

My deepest gratitude goes to my colleagues at IRDE, including Mr. M.K. Mathuria and Mr. Anil Kumar. I am also grateful to my lab mates at IIT Delhi – Ms. Sunita Bhatt, Mr. Ritish Kamboj, Dr. Ritambhara, Dr. Abhishek, and Dr. Vimarsh for their constant support, and encouragement. Additionally, I would like to thank my friend, Mr. Manoj Sharma, for his unwavering companionship and encouragement.

Finally, and most importantly, I express my deepest gratitude to my family for their unwavering support and encouragement throughout my PhD journey. Their emotional support, especially during challenging times, has been invaluable. To my mother, whose blessings and love have been my foundation, thank you for always believing in me. I sincerely thank my wife, Nandini, for her patience, understanding, and constant encouragement. To my son, Sagnik, his smiles and laughter have been my greatest

motivation. I am also profoundly grateful to my brothers, Mr. Manabendra Majumder, Mr. Angshuman Majumder, Mr. Debabrata Majumder, and Mr. Subrata Majumder, for their support and faith in my endeavours. Their collective belief in me has been my greatest strength.

Date:

Sudhabrata Majumder

Abstract

Recent years have witnessed a surge in bomb explosions worldwide. Incidents involving injuries to military personnel, loss of innocent lives, significant port explosions, and various threats in conflict zones. These incidents highlight the critical need to develop a reliable sensing platform for detection of explosives to enhance public safety and national security.

Explosive detection remains a significant concern in the modern world due to the growing sophistication of explosive devices and the diverse environments in which they can be deployed. Consequently, developing a reliable explosive detection system is a top priority. One promising technique for chemical detection is Raman spectroscopy. When a monochromatic light illuminates the chemicals, a small amount of light scatters inelastically, offering a highly specific "fingerprinting" capability to identify molecules, making it invaluable for detecting chemicals.

However, the practical application of Raman spectroscopy faces challenges due to its nature of point-detection as the probability of detecting explosives decreases over larger areas. Raman spectroscopic imaging has emerged as a viable solution, addressing this issue by scanning larger areas, thus improving detection probabilities.

Traditional spectroscopic imaging methods are primarily based on raster scanning, which sequentially acquires data from each point in a sample. These methods provide high spatial resolution but are time-consuming, resulting in lengthy acquisition times for Raman images. Compressive sensing offers a transformative approach by significantly reducing acquisition times, thereby overcoming this limitation.

Compressive sensing techniques exploit the sparsity of signals to reconstruct images from fewer measurements than conventional methods would require. A notable application of compressive sensing in digital imaging is the single-pixel camera, which captures images using a single photodetector rather than a two-dimensional detector array. This innovative framework can be extended to multidimensional Raman spectroscopic imaging, enhancing the efficiency and speed of explosives detection over large areas.

Integrating the single-pixel imaging framework with Raman spectroscopy makes it possible to develop a robust system capable of standoff explosives detection. This advancement enhances the effectiveness of explosives detection. It provides a scalable solution adaptable to various defence and security contexts, food quality checks, medical imaging, pharmaceuticals, etc.

The present thesis deals with developing Raman Spectral Imaging using a single-pixel camera (SPC) framework. The concept design can detect explosive materials from a standoff distance. Presently, the standoff detection range is limited to four meters. However, increasing the laser power and specially designed optics can enhance the detection range. The entire thesis is planned in six chapters.

Chapter 1 begins by emphasizing the critical importance of explosives detection systems in ensuring public safety, preventing terrorism, and protecting infrastructure. It then explores various explosives detection techniques under bulk and trace detection techniques. Among these, Raman spectroscopy stands out due to its potential for high specificity and unique fingerprinting characteristics that allow for the precise identification of explosive materials. However, a significant drawback of Raman spectroscopy is its poor sensitivity, which limits its effectiveness in detecting low concentrations of explosives. To address this limitation, advancements in Raman imaging are being explored, enhancing sensitivity and

enabling more accurate and reliable detection. This chapter investigates these techniques, highlighting the motivation for exploring Raman Spectral Imaging for explosives detection providing an economical solution.

Chapter 2 provides a comprehensive overview of CS, offering a detailed understanding of its principles and applications. It begins with a mathematical explanation of CS, demonstrating how this technique reduces acquisition time by strategically subsampling the given signals. This chapter explains the architecture, working principle and hardware implementation of a SPC. This chapter provides an in-depth analysis of the effect of light transmission through coded masks and the number of compressive measurements on the quality of the reconstructed image. This chapter provides the reconstruction of the image from compressive measurements. Finally, analysis of reconstructed images obtained through different coded mask patterns has been presented.

Chapter 3 provides an overview of traditional scanning-based spectral imaging techniques and explores different SPC architectures to overcome the slow acquisition times associated with these methods. It discusses the hardware implementation of the SPC framework for acquiring three-dimensional spectro-spatial data with high compression rate. It covers the reconstruction of spectral imaging using various algorithms, the enhancement of these reconstructions with total variation (TV) denoising techniques, and the evaluation of reconstruction quality.

Chapter 4 introduces active and passive spectral imaging and different applications of active spectral imaging and key parameters. The chapter discusses the limitations of traditional spectral imaging systems and how to overcome using CS. It explores research conducted by various scholars on active spectral imaging using the SPC framework, along

with the contribution of our own study. The chapter demonstrate the development of active spectral imaging architecture using the SPC framework, emphasizing its high-resolution capabilities. This chapter highlights achievements, including a remarkable spectral resolution and a detailed comparison of spectral image reconstruction using various algorithms. The chapter introduces quality analysis of the reconstructed spectral images using several reference-less quality assessment algorithms. The chapter presents a reverse analysis where full spectral reconstruction is achieved from the reconstructed image cube, resulting in improved spectral information.

Chapter 5 presents the various applications of traditional Raman imaging in various fields. The chapter introduce the classification of Raman Spectral imaging and long acquisition times associated with them. It explains the utilization of CS to address the issue. The chapter explores the similar studies carried out by various researches. The chapter also highlights the achievements including reduced acquisition time, increased standoff detection range, and enhanced spatial classification of multiple explosives using a CCD-based spectrometer. The chapter demonstrates the system's effectiveness at various distances for detecting single or multiple explosives and explains the synchronization circuit for efficient spectro-spatial compressive measurements. Finally, it showcases the system's versatility by reconstructing Raman spectral images across different detection ranges, reinforcing its innovative nature.

Chapter 6 summarizes the research work performed and presented in the previous chapters and briefly presents the scope for future research and development in this direction.

सारांश

हाल के वर्षों में विश्व भर में बम विस्फोटों की घटनाओं में वृद्धि देखी गई है। इन घटनाओं में सामरिक कर्मियों घायल, निर्दोष लोगों की मौतें, बंदरगाह विस्फोटों और संघर्ष क्षेत्रों में विभिन्न प्रकार के खतरों को शामिल किया जा सकता है। इन घटनाओं के कारण सार्वजनिक सुरक्षा और राष्ट्रीय सुरक्षा को बढ़ाने के लिए विस्फोटकों का पता लगाने के लिए एक विश्वसनीय प्रणाली विकसित करने की महत्वपूर्ण आवश्यकता है।

विस्फोटक उपकरणों के बढ़ते उपयोग और उन्हें तैनात करने की विभिन्न स्थितियों के कारण आधुनिक दुनिया में विस्फोटकों का पता लगाना एक महत्वपूर्ण चिंता का विषय बना हुआ है। रासायनिक पहचान के लिए रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी एक आशाजनक तकनीक है। जब एक एकवर्णी प्रकाश रसायनों पर पड़ता है, तो प्रकाश का एक छोटा भाग अप्रत्यास्थ रूप से बिखरता है, जो अणुओं की पहचान करने के लिए एक विशिष्ट "फिंगरप्रिंटिंग" क्षमता प्रदान करता है। यह विशेषता रसायनों का पता लगाने में अमूल्य साबित होती है।

रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी का व्यावहारिक उपयोग बिंदु-संसूचन की प्रकृति के कारण चुनौतियों का सामना करता है, क्योंकि बड़े क्षेत्रों में विस्फोटकों का पता लगाने की संभावना कम हो जाती है। रमन स्पेक्ट्रोस्कोपिक इमेजिंग इस समस्या का एक व्यावहारिक समाधान प्रस्तुत करती है, जो बड़े क्षेत्रों को स्कैन करके पहचान की संभावना को बढ़ाती है।

पारंपरिक स्पेक्ट्रोस्कोपिक इमेजिंग विधियां मुख्यतः रास्टर स्कैनिंग पर आधारित हैं, जो नमूने के प्रत्येक बिंदु से डेटा को क्रमिक रूप से एकत्र करती हैं। ये विधियां उच्च स्थानिक रिज़ॉल्यूशन प्रदान करती हैं, लेकिन इनमें समय अधिक लगता है, जिसके कारण रमन इमेजिंग का अधिग्रहण धीमा हो जाता है। कंप्रेसिव सेंसिंग इस सीमा को दूर करते हुए अधिग्रहण समय को काफी कम कर देती है।

कंप्रेसिव सेंसिंग तकनीक पारंपरिक तरीकों की तुलना में कम माप से छवियों को फिर से पुनर्निर्मित के लिए संकेतों की विरलता (स्पार्सिटी) का फायदा उठाती है। डिजिटल इमेजिंग में कंप्रेसिव सेंसिंग का एक उल्लेखनीय अनुप्रयोग सिंगल-पिक्सेल कैमरा है, जो दो-आयामी डिटेक्टर सरणी के बजाय एक ही फोटोडिटेक्टर का उपयोग करके छवियों को कैप्चर करता है। इस अभिनव ढांचे को बहुआयामी रमन स्पेक्ट्रोस्कोपिक इमेजिंग तक बढ़ाया जा सकता है, जिससे बड़े क्षेत्रों में विस्फोटकों का पता लगाने की दक्षता और गति बढ़ती है।

सिंगल-पिक्सेल इमेजिंग ढांचे को रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी के साथ एकीकृत करके एक मजबूत प्रणाली विकसित की जा सकती है, जो दूर से विस्फोटकों का पता लगाने में सक्षम है। यह न केवल विस्फोटक पहचान की प्रभावशीलता को बढ़ाती है, बल्कि विभिन्न रक्षा और सुरक्षा संदर्भों, खाद्य गुणवत्ता जांच, चिकित्सा विज्ञान, फार्मास्यूटिकल्स आदि के लिए एक समाधान भी प्रदान करती है।

यह शोधप्रबंध सिंगल-पिक्सेल इमेजिंग या सिंगल-पिक्सेल कैमरा (SPC) ढांचे का उपयोग करके रमन स्पेक्ट्रल इमेजिंग के विकास से संबंधित है। इसकी अवधारणात्मक डिजाइन दूर से विस्फोटक सामग्री का पता लगा सकती है। वर्तमान में, इस तकनीक का उपयोग करके दूर से पहचान की सीमा चार मीटर तक सीमित है, हालांकि लेजर शक्ति बढ़ाने और विशेष रूप से डिजाइन किए गए ऑप्टिक्स के माध्यम से इस सीमा को बढ़ाया जा सकता है। संपूर्ण शोधप्रबंध को छह अध्यायों में विभाजित किया गया है।

अध्याय १ की शुरुआत विस्फोटक पहचान प्रणालियों के महत्व पर जोर देता है, जो सार्वजनिक सुरक्षा, आतंकवाद रोकने और बुनियादी ढांचे की सुरक्षा में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती हैं। यह अध्याय विस्फोटके थोक और अति लघु मात्रा पहचान तकनीकों के अंतर्गत विभिन्न विस्फोटक पहचान विधियों की चर्चा करता है। इनमें रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी एक विशिष्ट स्थान रखती है, क्योंकि यह उच्च विशिष्टता और फिंगरप्रिंटिंग विशेषताओं के कारण विस्फोटक सामग्री की सटीक पहचान करने में सक्षम है। हालांकि, रमन स्पेक्ट्रोस्कोपी की एक महत्वपूर्ण कमी इसकी कम संवेदनशीलता है, जो कम सांद्रता वाले विस्फोटकों का पता लगाने में बाधा उत्पन्न करती है। इस सीमा को दूर करने के लिए रमन इमेजिंग में उन्नति की जा रही है, जो संवेदनशीलता को बढ़ाकर अधिक सटीक और विश्वसनीय पहचान सक्षम करती है। यह अध्याय इन तकनीकों पर चर्चा करता है तथा विस्फोटकों का पता लगाने के लिए रमन स्पेक्ट्रल इमेजिंग की खोज की प्रेरणा भी बताता है।

अध्याय २ कंप्रेसिव सेंसिंग (CS) का एक व्यापक अवलोकन प्रस्तुत करता है, जिसमें इसके सिद्धांतों और अनुप्रयोगों की गहन समझ प्रदान की गई है। यह अध्याय CS के गणितीय स्पष्टीकरण के साथ शुरू होता है और दर्शाता है कि यह तकनीक सिग्नल को सबसैंपलिंग करके अधिग्रहण समय को कैसे कम करती है। इस अध्याय में SPC की संरचना, कार्य सिद्धांत और यंत्रसामग्री कार्यान्वयन की व्याख्या की गई है। यह कोडेड

मास्क के माध्यम से प्रकाश संचरण और कंप्रेसिव मापनों की संख्या के प्रभाव पुनर्निर्मित छवि की गुणवत्ता का गहन विश्लेषण प्रदान करता है। अंत में, विभिन्न कोडेड मास्क पैटर्न के माध्यम से प्राप्त पुनर्निर्मित छवियों के विश्लेषण को प्रस्तुत किया गया है।

अध्याय ३: पारंपरिक स्कैनिंग-आधारित स्पेक्ट्रल इमेजिंग तकनीकों का अवलोकन प्रस्तुत करता है और इन विधियों से जुड़े धीमे अधिग्रहण समय को दूर करने के लिए विभिन्न SPC आर्किटेक्चर की खोज करता है। यह उच्च संपीड़न दर के साथ त्रि-आयामी स्पेक्ट्रो-स्थानिक डेटा प्राप्त करने के लिए SPC ढांचे के हार्डवेयर कार्यान्वयन पर चर्चा करता है। इसमें विभिन्न एल्गोरिदम का उपयोग करके स्पेक्ट्रल इमेजिंग के पुनर्निर्माण, टोटल वेरिएशन (TV) डिनाइजिंग तकनीकों के साथ इन पुनर्निर्माणों को बढ़ाने और पुनर्निर्माण गुणवत्ता के मूल्यांकन को शामिल किया गया है।

अध्याय ४ सक्रिय और निष्क्रिय स्पेक्ट्रल इमेजिंग का परिचय देता है और सक्रिय स्पेक्ट्रल इमेजिंग के विभिन्न अनुप्रयोगों एवं मुख्य पैरामीटर्स पर चर्चा करता है। यह अध्याय पारंपरिक स्पेक्ट्रल इमेजिंग प्रणालियों की सीमाओं और CS का उपयोग करके इन्हें कैसे दूर किया जा सकता है, पर प्रकाश डालता है। इसमें SPC ढांचे का उपयोग करके विभिन्न शोधकर्ताओं द्वारा किए गए अध्ययनों के साथ-साथ हमारे स्वयं के अध्ययन के योगदान का भी पता लगाया गया है। यह अध्याय उच्च-रिज़ॉल्यूशन क्षमताओं पर जोर देते हुए SPC ढांचे का उपयोग करके सक्रिय स्पेक्ट्रल इमेजिंग आर्किटेक्चर के विकास को प्रदर्शित करता है। इसमें विभिन्न एल्गोरिदम का उपयोग करके स्पेक्ट्रल छवि पुनर्निर्माण की तुलना और उच्च स्पेक्ट्रल रिज़ॉल्यूशन जैसी उपलब्धियों को उजागर किया गया है। यह अध्याय कई संदर्भ-रहित गुणवत्ता मूल्यांकन एल्गोरिदम का उपयोग करके पुनर्निर्मित स्पेक्ट्रल छवियों के गुणवत्ता विश्लेषण को प्रस्तुत करता है। अंत में, इसमें एक विशेष विश्लेषण प्रस्तुत किया गया है, जहां पुनर्निर्मित छवि घन से पूर्ण स्पेक्ट्र पुनर्निर्माण किया जाता है, जिसके परिणामस्वरूप स्पेक्ट्रल जानकारी में सुधार होता है।

अध्याय ५ विभिन्न क्षेत्रों में पारंपरिक रमन इमेजिंग के विभिन्न अनुप्रयोगों को प्रस्तुत करता है। यह अध्याय रमन स्पेक्ट्रल इमेजिंग का वर्गीकरण और इससे जुड़े लंबे अधिग्रहण समय का परिचय देता है। यह इस मुद्दे को हल करने के लिए CS के उपयोग की व्याख्या करता है। यह अध्याय विभिन्न शोधकर्ताओं द्वारा किए गए समान अध्ययनों की भी खोज करता है। इसमें कम अधिग्रहण समय, बढ़ी हुई दूर से पहचान सीमा और CCD-आधारित स्पेक्ट्रोमीटर का उपयोग करके कई विस्फोटकों के स्थानिक वर्गीकरण जैसी उपलब्धियों को भी उजागर किया

गया है। यह अध्याय एकल या कई विस्फोटकों का पता लगाने के लिए विभिन्न दूरी पर सिस्टम की प्रभावशीलता को प्रदर्शित करता है और कुशल स्पेक्ट्रो-स्थानिक कंप्रेसिव मापन के लिए सिंक्रोनाइज़ेशन सर्किट की व्याख्या करता है। अंत में, यह विभिन्न पहचान सीमाओं में रमन स्पेक्ट्रल छवियों के पुनर्निर्माण को प्रदर्शित करके सिस्टम की प्रतिभा को दर्शाता है, जो इसकी अभिनव क्षमता को दर्शाता है।

अध्याय ६ पिछले अध्यायों में किए गए और प्रस्तुत किए गए शोध कार्य का सारांश प्रस्तुत करता है और इस दिशा में भविष्य के शोध और विकास के दायरे को संक्षेप में प्रस्तुत करता है।

Content

Certificate	i
Acknowledgements	ii
Abstract	iv
Contents	viii
List of Figures	xii
List of Tables	xvii
List of Abbreviations	xviii
List of Symbol	xx
1. Introduction	1
1.1. Overview	1
1.2. Explosive Detection Techniques	1
1.3. Raman Scattering & Spectroscopy	12
1.4. Raman Spectroscopy for Explosive Detection	13
1.5. Motivation	14
1.6. Research Objectives	15
1.7. Thesis Organization	16
2. Compressive Sensing and Single Pixel Camera	17
2.1. Summary	17
2.2. Introduction	17
2.3. Sampling Theorem	19
2.3.1. Nyquist Theorem	19
2.3.2. Mathematical Proof of Sampling Theorem	20
2.4. Vector Representation of Signal	20
2.4.1. L1 Norm	21
2.4.2. L2 Norm	22
2.5. Compressive Sensing	22
2.5.1. Sparsity	23
2.5.1.1. k-sparse signal	24

2.5.1.2.	Sparsity and compressibility	24
2.5.2.	Sparse Representation	24
2.5.3.	Compressive Measurements	26
2.6.	Recovery	27
2.6.1.	Underdetermined Equations	27
2.6.2.	Least Square Solution	28
2.6.3.	Sparse Solutions	29
2.7.	Sensing Matrix	30
2.7.1.	Null Space Property (NSP)	31
2.7.2.	Restricted Isometry Property (RIP)	31
2.7.3.	Mutual Coherence (MC)	32
2.7.4.	Measurement Matrix	33
2.8.	Application of Compressive Sensing	34
2.8.1.	Medical Imaging	35
2.8.2.	Wireless Sensor Networks	35
2.8.3.	Geophysics	35
2.8.4.	Communications	35
2.8.5.	Digital Imaging and Storage	36
2.9.	Single Pixel Camera	36
2.9.1.	Overview	36
2.9.2.	Background and related work	38
2.9.3.	Programable Coded Mask Generation	40
2.9.3.1.	Generation of Coded masks	41
2.9.3.2.	Displaying Mask on Display	43
2.9.4.	Hardware Implementation	46
2.9.5.	Software Implementation	48
2.9.6.	Result and Discussion	49
2.9.7.	Conclusion	54
3.	Spectral Imaging using Compressive Sensing	55
3.1.	Summary	55
3.2.	Introduction	56
3.3.	Classification of Spectral Imaging	57
3.2.1	RGB	58
3.2.2	Multispectral Imaging	58

3.2.3	Hyperspectral Imaging	58
3.4.	Acquisition Techniques	60
3.4.1.	Point scanning	60
3.4.2.	Line scanning	60
3.4.3.	Spectral scanning	61
3.5.	Spectral data acquisition model	62
3.6.	Spectral Image Cube	63
3.7.	Background and related work	63
3.8.	Compressive Sensing Imaging Model	64
3.9.	Compressive Sensing in Spectral Imaging	64
3.9.1.	Spatial Encoding	65
3.9.2.	Spectral encoding after spatial encoding	66
3.9.3.	Spatial encoding after spectro-spatial conversion	67
3.9.4.	Interferometric spectro-spatial encoding	68
3.10.	Background and Work Done	69
3.11.	Experimental Details	71
3.12.	Results and Discussion	74
3.13.	Conclusion	76
4.	High Resolution Spectral Imaging using Compressive Sensing	78
4.1.	Summary	78
4.2.	Introduction	79
4.3.	Passive Spectral Imaging	79
4.4.	Active Spectral Imaging	80
4.5.	Application of Active Spectral Imaging	81
4.5.1.	Standoff Detection Hazardous Chemical	81
4.5.2.	Oil Spillage Detection	82
4.5.3.	Gas Leakage Detection	83
4.5.4.	Concealed Object Detection	84
4.5.5.	Medical Imaging	85
4.5.6.	Specific Areas of Applications	87
4.6.	Key factors of Active Spectral Imaging	87
4.6.1.	Wavelength Coverage	87
4.6.2.	Spectral Resolution	88

4.6.3.	Spatial Resolution	88
4.6.4.	Types of Illumination	88
4.6.5.	Uniformity of Illumination	89
4.7.	Background and related work	89
4.8.	Mathematical Model	93
4.9.	Experimental Details	94
4.10.	Results and Discussion	96
4.11.	Conclusion	105
5.	Raman Spectral Imaging using Compressive Sensing for Explosive Detection	106
5.1.	Summary	106
5.2.	Introduction	107
5.3.	Applications Raman spectral imaging	107
5.3.1.	Drug Formulation and Quality Control	107
5.3.2.	Tissue and Cell Analysis	108
5.3.3.	Characterization of Nanomaterials	108
5.3.4.	Stress and Stain Analysis	109
5.3.5.	Hazardous Chemical Identification	110
5.3.6.	Process Monitoring	111
5.3.7.	Pollution Detection	111
5.3.8.	Study of Archaeological Samples	112
5.3.9.	Authentication and Conservation	113
5.3.10.	Food quality Control	114
5.4.	Methodology of Raman Spectral Imaging	114
5.4.1.	Series Imaging	115
5.4.2.	Direct Imaging	116
5.5.	Background and related work	117
5.6.	Experimental Details	119
5.7.	Results and Discussion	122
5.8.	Conclusion	127
6.	Conclusion and Future Work	127
7.	References	133
8.	List of Publication	165
9.	Author's Biography	166

List of Figures

S. No.	Caption
1.1	Classification of Explosives Detection Techniques.
1.2	Principle of Raman scattering. (a) Raman scattering and Rayleigh scattering. (b) Energy level diagram of Raman scattering & Rayleigh scattering.
2.1	Sparse signal with ten non-zero and five hundred and two zero elements.
2.2	(a) A vectorized digital signal (b) Coefficient vector of signal in DCT domain.
2.3	(a) Random Gaussian sensing of size 120×512 (b) Compressive measurement of signal 120×1 shown in Fig. 2.1.
2.4	Reconstruction of the original signal using Least square method.
2.5	Reconstruction of original signal using sparse solution.
2.6	Random Measurement Matrix generation (a) Φ with light 10% transmission (b) 64×64 binary coded mask with 10% transmission.
2.7	Coded mask transmission (a) 20% (b) 30% (c) 40% (d) 50% (e) 60% (f) 70% (g) 80% (h) 90%.
2.8	Displaying the coded mask on the screen.
2.9	Coded Mask (a) 32×32 of size 250 display pixel (b) 32×32 of size 500 display pixel (c) 64×64 of size 250 display pixel (d) 64×64 of size 500 display pixel (e) 128×128 of size 250 display pixel (f) 128×128 of size 500 display pixel (g) 256×256 of size 250 display pixel (h) 256×256 of size 500 display pixel.
2.10	Schematic of the experimental setup.
2.11	Photograph of the experimental setup.
2.12	Flowchart of the application program for compressive measurements.

- 2.13 Programmable projection window.
- 2.14 Photograph actual scene (a) printout of IITD on paper (b) 'T' shape paper cut out.
- 2.15 Transmittance of mask patterns used during CS measurements (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80%.
- 2.16 Reconstructed image based on the mask pattern of transmittance (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80%.
- 2.17 Correlation between the SSIM score and transmission of mask patterns in terms of percentage (%).
- 2.18 Transmittance of mask patterns used during CS measurements 50%.
- 2.19 Reconstructed images of the target scene based on (a) 5%, (b) 10%, (c) 15%, (d) 20%, (e) 25% (f) 30% of measurements of the total number of pixels.
- 2.20 Correlation between the SSIM scores and compression rate in percentage (%).
- 3.1 Illustration of the portion of the electromagnetic spectrum typically used in hyperspectral imaging, ranging from 250 to 15000 nm. Image courtesy of [161].
- 3.2 Spectral signature of any point in a natural scene.
- 3.3 Comparison of spectral information and resolution of (a) RGB image, (b) Multispectral Imaging, and (c) Hyperspectral Imaging.
- 3.4 The three primary spectral acquisition modes are (a) Point Scanning or whiskbroom (b) Line Scanning or push broom (c) Wavelength Scanning or spectral scan.
- 3.5 Spectro-spatial data acquired by the different scanning techniques in each time slot.
- 3.6 Spectral Data Cube with spectral signature.
- 3.7 Spectral Imaging using SPC modality for spatial encoding and no spectral encoding.
- 3.8 Spectral Imaging using SPC modality with spectral encoding followed by spatial encoding.

- 3.9 Optical arrangement of spectral imaging using SPC architecture where spatial encoding happened after spectral to spatial conversion. Image courtesy of [193].
- 3.10 Schematic of Fourier transform spectral imaging system based on single pixel technology. The image is adapted from [198].
- 3.11 Schematic of the Experimental Setup.
- 3.12 Photograph of the Experimental Setup.
- 3.13 Graphical user interface for target scene simulator.
- 3.14 Simulation of target scene populated on laptop screen (a) Without any modulation (b) Modulated with 25×25 random coded mask pattern.
- 3.15 Few spectro-spatial compressive measurements.
- 3.16 Reconstructed spectral images using (a) basis pursuit algorithm and denoised using TV method (b) least square method and denoised using TV method.
- 3.17 (a) Reconstructed images of green band using a Basis pursuit algorithm and TV denoised (a) using 26 measurements (b) using 25 measurements.
- 4.1 An illustration of (a) Passive Spectral Imaging (b) Active Spectral Imaging.
- 4.2 (a) Reference Raman spectra of Ammonium Nitrate fuel oil explosive (b) A Raman map of the location of the explosive. Images are adapted from Almedia et al. [216].
- 4.3 (a) Fluorescence Spectra of Crude oil (b) Spectral image of Crude Oil. The images are adapted from Jiang et al. [219].
- 4.4 Spectral imaging of methane gas using a scanning, open-path laser system. The image is adapted from Gibson et al. [221].
- 4.5 (a) Target scene capture using RGB camera. (b) Totally and partially obscured objects are identified marked as A, B, C, D, E and F. The image is adapted from Johnson et al. [225].
- 4.6 (a) RGB image of a removed colon tumor (b) A pathology image used for diagnosis (c) A hyperspectral along with a classification result. Adapted from Baltussen et al. [236].
- 4.7 Schematic of the active spectral imaging using SPC framework.
- 4.8 Photograph of (a) the scene (b) projection matrix displayed on SLM.

- 4.9 The spectrum of illuminating light (orange) and 100th compressive spectro-spatial measurements (blue).
- 4.10 Visual comparison of image reconstruction at a few wavelengths (440 nm, 475 nm, 510 nm, 545 nm, 580 nm, 615 nm, 650 nm) gradations by different Algorithms.
- 4.11 Comparative analysis of different algorithms regarding average reconstruction time (sec).
- 4.12 Quality score estimated using (a) BRISQUE (b) NIQE (c) PIQE metrics for the images reconstructed by CoSaMP, OMP, TVAL3, and TwIST algorithms (d) The average quality scores estimated using BRISQUE, PIQE, and NIQE.
- 4.13 Reconstructed Spectral Images in the wavelength band 435 nm to 670 nm using TVAL3.
- 4.14 Spectral image in spectral band 433.407 nm to 445.874 nm with spectral resolution 0.25 nm.
- 4.15 Spectral Reconstruction at few spatial positions.
- 5.1 (a) In-vivo photograph of prostate cancer DU145 cells (b) Raman image at 1440 cm⁻¹. Images are adapted from Tanwar et al. [298].
- 5.2 TERS of GO on a silicon substrate at Raman band (a) at ~1350 cm⁻¹ (b) at ~700 cm⁻¹ (c) Raman spectra of GO (blue), oxidized Si wafer substrate (black). Images are adapted from Voylov et al. [302].
- 5.3 (a) Raman image of MoS₂ crystals using the 385 cm⁻¹ and 405 cm⁻¹ bands. (b) 385 cm⁻¹ band of MoS₂ crystal is red-shifted under stress, whereas 405 cm⁻¹ is insensitive to stress. The images are adapted from Appl. Note AN_R15, Edinburgh Instruments [306].
- 5.4 (a) White light image of four explosive materials, Raman image of (b) Sulphur (c) Dinitro toluene (DNT) (d) Ammonium Nitrate (AN) (e) Trinitro Toluene (TNT). The images are adapted from [309].
- 5.5 (a) SERS spectrum of 100 nm polystyrene particle (b) Raman Image of the 100 nm polystyrene particle. The images are adapted from Shorny et al. [314].
- 5.6 (a) Light microscopy image of the fossilized tibia of *Deinocheirus mirificus* (b) Corresponding Raman microscopy image over a series of Raman bands recorded within 1200-1900 cm⁻¹ spectral range. Images are adapted from Jurašková et al. [317].

- 5.7 Photographs showing (a) Part of Gola Muza/Naked Muse artwork, (b) barium white pigment Raman image, (c) calcite pigment Raman image. The photographs are adapted from Ropret et al. [318].
- 5.8 (a) Raman spectra for the sample milk powder (b) Reference and recovered spectrum of urea (c) Raman image of urea. Images are adapted from Yan et al. [320].
- 5.9 Schematic of Direct Raman Imaging System. The image is adapted from Nordberg et al. [327].
- 5.10 Confocal Raman Imaging System
- 5.11 Schematic of the proposed CS-based Raman spectral imaging setup.
- 5.12 Photograph of the experimental setup for CS-based Raman spectral imaging.
- 5.13 External Hardware Triggering and spectrometer data acquisition timing.
- 5.14 Triggering Electronics.
- 5.15 64×64 binary Coded Mask Pattern with 50% reflecting pixels.
- 5.16 First five spectro-spatial compressive measurements in Raman shift range 1000 cm^{-1} to 3500 cm^{-1} .
- 5.17 (a) PNBA illuminated by the laser during sampling (b) Raman Spectrum of the PNBA at a distance of 4 m.
- 5.18 The reconstructed spectral images of the PNBA (a) at 1118 cm^{-1} (b) at 1352 cm^{-1} (c) at 1616 cm^{-1} (d) at 3075 cm^{-1} .
- 5.19 (a) Both the samples under illumination by the laser (b) Superimposed Raman Spectrum of PNBA and Sodium Nitrate.
- 5.20 (a) Spectral Image of the Sodium Nitrate at 1070 cm^{-1} (b) Spectral images of the PNBA 1118 cm^{-1} (c) Spectral images of the PNBA at 1352 cm^{-1} (d) Spectral images of the PNBA at 1616 cm^{-1} (e) at 3075 cm^{-1} .

List of Tables

S. No.	Caption
2.1	SSIM scores reported in active single-pixel imaging.
3.1	Comparison of PSNR value between basis pursuit and least-square reconstruction.
4.1	Spectral resolution reported by researchers in similar types of work.
4.2	Performance comparison of CoSaMP, OMP, TVAL3, and TwIST in terms of reconstruction time (sec).
4.3	Quality score of the spectral images generated using CoSaMP, OMP, TVAL3 and TwIST using NR-IQA Algorithms.

List of Abbreviations

SPC	Single Pixel Camera
CS	Compressive Sensing
PPM	Parts Per Million
PPT	Parts Per Trillion
HSI	Hyper Spectral Imaging
LED	Light emitting diode
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
ROI	Region of interest
RGB	Red-Green-Blue
SERS	Surface Enhanced Raman Spectroscopy
TERS	Tip enhanced Raman spectroscopy
MRS	Micro Raman Spectroscopy
SPM	Scanning Probe Microscopy
DCT	Discrete Cosine Transform
DWT	Discrete Wavelet Transform
NR-IQA	No Reference Image Quality Analysis
CCD	Charge Coupled Device
ICCD	Intensified CCD
ADC	Analog to Digital Converter

MRI	Magnetic Resonance Imaging
CT	Computed Tomography
WSN	Wireless Sensor Networks
NSP	Null space Property
RIP	Restricted Isometry Property
MC	Mutual Coherence
SSIM	Structural Similarity Index Measure
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio
NA	Numerical Aperture
TV	Total Variation
CW	Continuous Wave
API	Active Pharmaceutical Ingredients
LCTF	Liquid Crystal Tunable Filter

List of Symbols

Ψ	Orthonormal basis matrix
ψ_i	Column vector
α	Coefficient vector
Φ	Measurement matrix
ϕ_j	Row vector of a measurement matrix
A	Sensing matrix
λ	Regularization parameter/wavelength
\mathcal{N}	Null Space Property
δ	Constant
μ	Mutual Coherence/mean
σ	Variance
ϵ	Noise
γ	Regularization parameter
@	at
ω	Measurement noise
Λ	Number of spectral bands
#	Number sign

