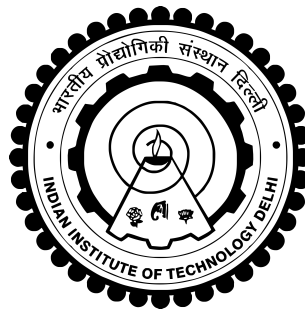


CIRCUITS AND SYSTEMS FOR SMART IOT PLATFORMS

PAYALI DAS



**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
JULY 2024**

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, India, 2024

CIRCUITS AND SYSTEMS FOR SMART IOT PLATFORMS

by

PAYALI DAS

Department of Electrical Engineering

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the



INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

JULY 2024

Dedicated to my parents
Mr. Ranjit Kumar Das & Ms. Samita Das

Certificate

This is to certify that the dissertation entitled **Circuits and Systems for Smart IoT Platform**, submitted by **Ms. Payali Das (2019EEZ8563)**, a Research Scholar, in the *Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India*, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of an original research work carried out by her under our supervision and guidance. The dissertation fulfils all requirements per this Institute's regulations and has reached the standard needed for submission. Neither this dissertation nor any part has been submitted for any degree or academic award elsewhere.

Prof. Shouri Chatterjee

Department of EE

IIT Delhi

New Delhi, India, 110016

Prof. Swades De

Department of EE

IIT Delhi

New Delhi, India, 110016

Acknowledgements

First and foremost, I would like to thank Prof. Shouri Chatterjee and Prof. Swades De, my PhD supervisors. Their constant assistance, advice, and encouragement have been vital throughout the entire process. Their unwavering presence and depth of experience have been important in shaping my academic career, from the early phases of developing my research proposal to the final submission of my thesis. I highly valued all our meetings since they not only served as important checkpoints to keep me on track academically but also provided me with plenty of encouragement. I am eternally grateful for their immense contributions to my progress.

I would also like to thank the members of my PhD thesis committee: Prof. Mukul Sarkar, Prof. Ankesh Jain, and Prof. Ankur Gupta. Thank you for your time and effort, and for providing valuable feedback and thought-provoking questions. Your insights have greatly enriched the quality of my work. I count myself fortunate to be a part of an esteemed institution such as IIT Delhi, where I acquired knowledge from excellent courses offered by the Department of Electrical Engineering.

I would like to thank the funding agencies Department of Telecommunication, Department of Science and Technology, and Science and Engineering Research Board, Government of India, for their assistance through various projects during my PhD tenure, which allowed me to design and validate my systems.

I am grateful to my M.Tech supervisor Prof. Alok Majumder from the National Institute of Technology, Arunachal Pradesh, for encouraging me to pursue a career in research. I also want to thank him for persuading me to join the Department of Electrical Engineering PhD program and Prof. Shouri Chatterjee's research group at IIT Delhi.

I am thankful to my fellow researchers and friends, Ashutosh and Sushmita who made this journey memorable at IIT Delhi. Finally, I would like to thank my mother, Ms. Samita Dutta, my father Mr. Ranjit Kumar Das, and my younger brother Mr. Rajarshee Das for their consistent support and encouragement during my PhD. work. Thank you for everything. I am indebted to the sacrifices my parents have made to shape my career and I dedicate this dissertation to them.

As I bring my four-year-long PhD journey to a close, I can genuinely say that I am immensely proud of my accomplishments. This transformative journey has shaped me as a researcher and an individual, imparting the invaluable lesson that perseverance yields fruitful rewards in the long run. The unwavering commitment and determination displayed by those around me have profoundly influenced my character.

Payali Das
(2019EEZ8563)

Abstract

Energy availability is a major concern for battery-powered Internet of Things (IoT) nodes, particularly for the widespread deployment of wireless sensor networks (WSNs). In order to address this challenge and make IoT nodes self-sustainable by utilizing harvested power, it is imperative to design nodes that consume very low power and the sensors must be redesigned to be more efficient than commercially available sensors. To ensure the long-term sustainability of wireless sensor networks, this dissertation is focused on developing energy-harvested smart IoT platforms that are efficient and versatile enough to be used in various applications. We have developed low-power sensors with similar sensing quality to replace high-cost ones for air quality monitoring. Retrofitting of energy-sustainable smart energy metering has also been explored in this dissertation.

As a first step, we have designed a 5G-capable environmental sensing network (ESN) node prototype called an air pollution monitoring device (APMD). APMD has electrochemical sensors to measure carbon monoxide, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, and ozone, besides temperature and humidity sensors, along with particulate matter (PM) sensors to measure $PM_{2.5}$ and PM_{10} . The node has been equipped with a solar energy harvesting unit and a rechargeable battery as a backup to power up the module. By utilizing an on-board GPS subsystem, APMD packs all these gathered air quality data in a frame with physical location, time, and date and sends them to a cloud server. The node can communicate through WiFi and NB-IoT connectivity. We have experimentally demonstrated that compared to the conventional designs with Wi-Fi-based connectivity, the developed system consumes ten times less energy while using 5G NB-IoT communication module, which makes it a very competitive candidate for massive deployment in highly polluted metro cities like Delhi and Kolkata, in India.

The second part of the thesis has extended the design of a low-power PM sensor and experimental validation of deployed APMD. The on-board PM sensor has been designed to measure $PM_{2.5}$ and PM_{10} . The developed APMD was co-located with an accurate reference sensor node to validate the sensing quality, and a series of field data were collected over seven days. In a fully ON state, the on-board PM sensor saves up to 94% energy while maintaining root mean square error (RMSE) of 0.58 for $PM_{2.5}$ and 2.5 for PM_{10} . A power control mechanism has also been applied on the PM sensor to control the speed of the fan by applying a pulse width modulated (PWM) signal at the switch connected to the power supply of the fan. At 100 ms switching period with 30% duty cycle, the on-board

PM sensor is 97% energy efficient compared to the commercial sensor while maintaining sensing error (RMSE) as low as 0.7 for $PM_{2.5}$ and 2.7 for PM_{10} . Our outdoor deployment studies has demonstrated that the designed APMD is 90.8% more power efficient than the reference setup, with a significantly higher coverage range, while maintaining an acceptable range of sensing error.

The third part of the dissertation has discussed the development and evaluation of an analog front end (AFE) for an ultraviolet (UV) based optical gas sensor module designed for air pollution monitoring applications. The proposed system can accurately measure concentrations of NO_2 , O_3 , and SO_2 by exploiting the principles of light absorption and scattering. Comparative analysis with data from the reference sensor demonstrates a strong correlation, validating the reliability and accuracy of the designed gas sensor module. Unlike traditional electrochemical gas sensors, which necessitate a complex AFE to detect gas concentrations, our designed module offers a more cost-effective solution with enhanced sensitivity and a compact design. This chapter elucidates the working principle, design considerations, and experimental results of the proposed gas sensor module, highlighting its advantages over conventional sensors.

Finally, the dissertation's last part has studied the retrofitting of a smart electricity metering system. A smart electricity meter is an example of an IoT device that is being installed in domestic and industrial premises to monitor power consumption along with various other services such as billing, load forecasting, and dynamic pricing. Usually, these IoT devices sample at a high rate and report the whole data to the cloud. In this process, a large amount of energy is consumed at the IoT node for data transmission, and a large bandwidth is used for transmission over the Internet, though for storage saving, some compression is performed at the destination. To this end, we aim to prune the IoT data at the source node by providing some intelligence, thereby aiding the wireless IoT node's energy sustainability and efficient channel bandwidth usage for scalable deployment. The IoT devices measuring single parameters or multiple parameters are judiciously pruned within an acceptable reconstruction error limit. In this work, we have reported the embedded implementation of data-driven dynamic pruning of multi-parameter smart meter data as an example demonstration of data-smart IoT nodes. Our performance results have shown that the energy and bandwidth savings with multiple univariate data pruning are respectively about 19% and 36%, whereas the savings with multivariate data pruning are respectively about 36% and 98%. The developed embedded data pruning module is 99.09% more energy efficient than the implementation on Raspberry Pi.

सार

बैटरी से चलने वाले इंटरनेट ऑफ थिंग्स (IoT) नोड्स के लिए ऊर्जा की उपलब्धता एक बड़ी चिंता का विषय है, खास तौर पर वायरलेस सेंसर नेटवर्क (WSN) की व्यापक तैनाती के लिए। इस चुनौती का समाधान करने और हार्वेस्टेड पावर का उपयोग करके IoT नोड्स को आत्मनिर्भर बनाने के लिए, ऐसे नोड्स को डिज़ाइन करना अनिवार्य है जो बहुत कम बिजली की खपत करते हैं और सेंसर को व्यावसायिक रूप से उपलब्ध सेंसर की तुलना में अधिक कुशल होने के लिए फिर से डिज़ाइन किया जाना चाहिए। वायरलेस सेंसर नेटवर्क की दीर्घकालिक स्थिरता सुनिश्चित करने के लिए, यह शोध प्रबंध ऊर्जा-संग्रहित स्मार्ट IoT प्लेटफॉर्म विकसित करने पर केंद्रित है जो विभिन्न अनुप्रयोगों में उपयोग किए जाने के लिए पर्याप्त कुशल और बहुमुखी हैं। हमने वायु गुणवत्ता निगरानी के लिए उच्च लागत वाले सेंसर को बदलने के लिए समान सेंसिंग गुणवत्ता वाले कम-शक्ति वाले सेंसर विकसित किए हैं। इस शोध प्रबंध में ऊर्जा-संधारणीय स्मार्ट ऊर्जा मीटरिंग की रेडिफिकेशन का भी पता लगाया गया है।

पहले कदम के रूप में, हमने 5G-सक्षम पर्यावरण संवेदन नेटवर्क (ESN) नोड प्रोटोटाइप तैयार किया है जिसे वायु प्रदूषण निगरानी उपकरण (APMD) कहा जाता है। APMD में कार्बन मोनोऑक्साइड, सल्फर डाइऑक्साइड, नाइट्रोजन डाइऑक्साइड और ओजोन को मापने के लिए इलेक्ट्रोकेमिकल सेंसर हैं, तापमान और आर्द्रता सेंसर के अलावा, PM_{2.5} और PM₁₀ को मापने के लिए पार्टिकुलेट मैटर (PM) सेंसर भी हैं। नोड को सौर ऊर्जा संचयन इकाई और मॉड्यूल को पावर देने के लिए बैकअप के रूप में एक रिचार्जबल बैटरी से लैस किया गया है। ऑन-बोर्ड GPS सबसिस्टम का उपयोग करके, APMD इन सभी एकत्रित वायु गुणवत्ता डेटा को भौतिक स्थान, समय और तारीख के साथ एक फ्रेम में पैक करता है और उन्हें क्लाउड सर्वर पर भेजता है। नोड WiFi और NB-IoT कनेक्टिविटी के माध्यम से संचार कर सकता है। हमने प्रयोगात्मक रूप से प्रदर्शित किया है कि वाई-फाई-आधारित कनेक्टिविटी वाले पारंपरिक डिज़ाइनों की तुलना में, विकसित प्रणाली 5G NB-IoT संचार मॉड्यूल का उपयोग करते समय दस गुना कम ऊर्जा की खपत करती है, जो इसे भारत में दिल्ली और कोलकाता जैसे अत्यधिक प्रदूषित मेट्रो शहरों में बड़े पैमाने पर तैनाती के लिए एक बहुत ही प्रतिस्पर्धी उम्मीदवार बनाती है।

थीसिस के दूसरे भाग में कम-शक्ति वाले पीएम सेंसर के डिज़ाइन और तैनात एपीएमडी के प्रायोगिक सत्यापन को आगे बढ़ाया गया है। ऑन-बोर्ड पीएम सेंसर को पीएम 2.5 और पीएम 10 को मापने के लिए डिज़ाइन किया गया है। विकसित एपीएमडी को संवेदन गुणवत्ता को मान्य करने के लिए एक सटीक संदर्भ सेंसर नोड के साथ सह-स्थित किया गया था, और सात दिनों में फ़िल्ड डेटा की एक श्रृंखला एकत्र की गई थी। पूरी तरह से चालू स्थिति में, ऑन-बोर्ड पीएम सेंसर 94% तक ऊर्जा बचाता है जबकि पीएम 2.5 के लिए 0.58 और पीएम 10 के लिए 2.5 का रूट माध्य वर्ग त्रुटि (आरएमएसई) बनाए रखता है। पंखे की बिजली आपूर्ति से जुड़े स्विच पर पल्स चौड़ाई मॉड्युलेटेड (पीडब्लूएम) सिग्नल लगाकर पंखे की गति को नियंत्रित करने के लिए पीएम सेंसर पर एक पावर कंट्रोल मैकेनिज्म भी लागू किया गया है। 30% ड्यूटी साइकिल के साथ 100 एमएस स्विचिंग अवधि में, ऑन-बोर्ड पीएम सेंसर वाणिज्यिक सेंसर की तुलना में 97% ऊर्जा कुशल है, जबकि संवेदन त्रुटि (आरएमएसई) को पीएम 2.5 के लिए 0.7 और पीएम 10 के लिए 2.7 के रूप में कम बनाए रखता है। हमारे आउटडोर परिनियोजन अध्ययनों ने प्रदर्शित किया है कि डिज़ाइन किया गया एपीएमडी संदर्भ सेटअप की तुलना में 90.8% अधिक ऊर्जा कुशल है, जिसमें काफी अधिक कवरेज रेंज है, जबकि संवेदन त्रुटि की स्वीकार्य सीमा बनाए रखता है।

शोध प्रबंध के तीसरे भाग में वायु प्रदूषण निगरानी अनुप्रयोगों के लिए डिज़ाइन किए गए पराबैंगनी (UV) आधारित ऑप्टिकल गैस सेंसर मॉड्यूल के लिए एनालॉग फ्रंट एंड (AFE) के विकास और मूल्यांकन पर चर्चा की गई है। प्रस्तावित प्रणाली प्रकाश अवशोषण और बिखराव के सिद्धांतों का उपयोग करके NO₂, O₃ और SO₂ की सांद्रता को सटीक रूप से माप सकती है। संदर्भ सेंसर से डेटा के साथ तुलनात्मक विश्लेषण एक मजबूत सहसंबंध प्रदर्शित करता है, जो डिज़ाइन किए गए गैस सेंसर मॉड्यूल की विश्वसनीयता और सटीकता को मान्य करता है। पारंपरिक इलेक्ट्रोकेमिकल गैस सेंसर के विपरीत, जिसमें गैस सांद्रता का पता लगाने के लिए एक जटिल AFE की आवश्यकता होती है, हमारा डिज़ाइन किया गया मॉड्यूल बड़ी हुई संवेदनशीलता और एक कॉम्पैक्ट डिज़ाइन के साथ अधिक

लागत प्रभावी समाधान प्रदान करता है। यह अध्याय प्रस्तावित गैस सेंसर मॉड्यूल के कार्य सिद्धांत, डिज़ाइन संबंधी विचारों और प्रयोगात्मक परिणामों को स्पष्ट करता है, पारंपरिक सेंसर पर इसके लाभों पर प्रकाश डालता है।

अंत में, शोध प्रबंध के अंतिम भाग में स्मार्ट बिजली मीटरिंग सिस्टम के रेट्रोफिटिंग का अध्ययन किया गया है। स्मार्ट बिजली मीटर एक IoT डिवाइस का उदाहरण है जिसे घरेलू और औद्योगिक परिसरों में बिजली की खपत की निगरानी के साथ-साथ बिलिंग, लोड पूर्वानुमान और गतिशील मूल्य निर्धारण जैसी विभिन्न अन्य सेवाओं के लिए स्थापित किया जा रहा है। आमतौर पर, ये IoT डिवाइस उच्च दर पर नमूना लेते हैं और पूरे डेटा को क्लाउड पर रिपोर्ट करते हैं। इस प्रक्रिया में, डेटा ट्रांसमिशन के लिए IoT नोड पर बड़ी मात्रा में ऊर्जा की खपत होती है, और इंटरनेट पर ट्रांसमिशन के लिए एक बड़ी बैंडविड्थ का उपयोग किया जाता है, हालांकि भंडारण की बचत के लिए, गंतव्य पर कुछ संपीड़न किया जाता है। इस उद्देश्य के लिए, हमारा उद्देश्य कुछ बुद्धिमत्ता प्रदान करके स्रोत नोड पर IoT डेटा को छाँटना है, जिससे वायरलेस IoT नोड की ऊर्जा स्थिरता और स्केलेबल परिनियोजन के लिए कुशल चैनल बैंडविड्थ उपयोग में सहायता मिलती है। एकल मापदंडों या कई मापदंडों को मापने वाले IoT उपकरणों को स्वीकार्य पुनर्निर्माण त्रुटि सीमा के भीतर विवेकपूर्ण तरीके से छाँटा जाता है। इस कार्य में, हमने डेटा-स्मार्ट IoT नोड्स के उदाहरण प्रदर्शन के रूप में मल्टी-पैरामीटर स्मार्ट मीटर डेटा के डेटा-संचालित डायनेमिक प्रूनिंग के एम्बेडेड कार्यान्वयन की रिपोर्ट की है। हमारे प्रदर्शन परिणामों से पता चला है कि कई यूनीवेरिएट डेटा प्रूनिंग के साथ ऊर्जा और बैंडविड्थ की बचत क्रमशः लगभग 19% और 36% है, जबकि मल्टीवेरिएट डेटा प्रूनिंग के साथ बचत क्रमशः लगभग 36% और 98% है। विकसित एम्बेडेड डेटा प्रूनिंग मॉड्यूल रास्पबेरी पाई पर कार्यान्वयन की तुलना में 99.09% अधिक ऊर्जा कुशल है।

Contents

Certificate	i
Acknowledgement	iii
Abstract	v
List of Figures	xi
List of Tables	xiii
1 Introduction	1
1.1 Context and Motivation	1
1.2 Prior Art on Air Pollution Monitoring System	3
1.2.1 On Development of Sensing Prototypes	3
1.2.2 On Energy Efficiency and Sustainability	7
1.3 Prior Art on Gas Sensing Device	8
1.4 Prior Art on Data Smart Energy Metering	11
1.5 Research Gaps	13
1.6 Thesis Contribution	15
1.7 Organization	16
2 Green, Sustainable Smart IoT Node: Air Pollution Monitoring Device	19
2.1 Introduction	19
2.2 Chapter Organization	21
2.3 System Design and Implementation	21
2.3.1 Sensor Selection	21
2.3.2 Communication Technologies	23

2.3.2.1	NB-IoT	23
2.3.2.2	WiFi	23
2.4	Basic Modules of APMD	24
2.4.1	Power Module	24
2.4.2	MCU and Radio Module	24
2.4.3	Sensing Module	26
2.5	Observation	26
2.5.1	Comparison of Energy Consumption between the sensors	26
2.5.2	Comparison of Energy Consumption between two protocols: WiFi and NBIoT	27
2.6	Summary	28
3	Design of PM Sensor with Power Control Mechanism and APMD Prototyping	31
3.1	Introduction	31
3.2	Chapter Organization	32
3.3	Design of PM Sensor and its Power control Mechanism	33
3.3.1	Basic PM Sensor Design	33
3.3.2	Power Control of On-Board PM Sensor	33
3.4	Prototype Design	36
3.4.1	APMD Board Design	36
3.4.2	Data Collection Setup	38
3.4.3	Firmware Development	39
3.5	Results and Discussion	41
3.5.1	Estimation of Optimum Duty Cycle for PM Sensor	42
3.5.2	Estimation of Optimum Parameter Values for APMD	44
3.5.3	Energy consumption of the sensors	44
3.5.4	Performance Comparison of the Designed APMD and Reference Board	44
3.6	Summary	52
4	UV Spectroscopy-based Gas Sensor Module for Air Quality Monitoring	55
4.1	Introduction	55
4.2	Chapter Organization	56
4.3	UV Spectroscopy	56

4.4	Gas sensing module	58
4.4.1	Design of the signal conditioning unit- AFE	58
4.4.2	Prototype design and data collection setup	60
4.5	Result and discussion	62
4.6	Summary	63
5	Backward compatible smart IoT nodes: Smart energy meter	65
5.1	Introduction	65
5.2	Chapter Organization	67
5.3	Data Driven Resource Optimization Approaches	67
5.3.1	Non-real-time univariate approach	67
5.3.2	Non-real-time multivariate approach	69
5.3.2.1	Principal component analysis	69
5.3.2.2	Compressive sensing	70
5.3.2.3	Adaptive multivariate data compression (AMDC)	70
5.4	Prototype Implementation of Data-Smart IoT Module in Energy Meter	70
5.4.1	Prototype I: Implementation on R-Pi	71
5.4.2	Prototype II: Implementation on microcontroller development board	72
5.4.3	Prototype III: Our designed data-smart IoT module	74
5.5	Experimental Results and Discussion	74
5.5.1	Reconstruction Performance	74
5.5.2	Energy Efficiency	75
5.5.3	Bandwidth Saving	75
5.6	Summary	76
6	Concluding Remarks and Future Works	77
6.1	Concluding Remarks	77
6.2	Future Works	79
	Bibliography	80
	Publications	91
	Biodata of the Author	95

List of Figures

1.1	Applications of IoT.	2
1.2	Architecture of IAQD [1].	4
1.3	Architecture of IoT-Mobair [2].	5
1.4	Gas sensing technology.	8
1.5	Gas sensing system in TRIAGE [3].	10
1.6	Experimental setup with the spherical gas cell for NO ₂ and SO ₂ detection [4].	11
1.7	Applications of smart meter.	12
1.8	System architecture of the GSM-based home controller [5].	13
2.1	Block diagram of proposed self-sustainable APMD.	22
2.2	Massively deployed APMD network with NB-IoT and WiFi connectivity.	22
2.3	Solar energy harvester and power management system with Buck converter and LDO.	25
2.4	NB-IoT and WiFi interface with microcontroller	25
2.5	Power consumption for all sensors in a fixed sampling interval	26
2.6	Energy consumption of NB-IoT and WiFi in Case 1.	27
2.7	Energy consumption of NB-IoT and WiFi in Case 2.	28
3.1	PM sensor circuitry.	34
3.2	Power control mechanism for PM sensor.	35
3.3	(a) Current and (b) Power consumption of PM sensor fan with changing duty cycle.	36
3.4	Designed APMD includes the STM32L476RG microcontroller, NB-IoT module, solar energy harvester, memory, and PM sensor. (a) Bottom side of the board and (b) Top side of the board.	37

3.5	Data collection setup.	39
3.6	Firmware flow	40
3.7	RMSE versus duty cycle for PM _{2.5} and PM ₁₀	42
3.8	PSD of the sensing parameters.	45
3.9	Variation of temporal prediction error and temporal correlation with lead value ζ^t	45
3.10	Temperature, humidity, and gas sensors data collected by the designed APMD and reference setup.	46
3.11	PM sensor data collected by the designed APMD and reference setup.	46
3.12	Solar power generated in 24 hrs.	48
3.13	Comparison of battery charging and discharging behaviour of the designed APMD and the reference setup.	50
3.14	Comparison of energy consumption behaviour of the designed APMD and the reference setup.	51
4.1	Block diagram of the gas sensing module	58
4.2	AFE block diagram of the gas sensing module	59
4.3	Gas sensor circuitry	59
4.4	Designed gas sensor module. (a) Bottom side of the board with LED-PD pairs and (b) Top side of the board with AFE.	60
4.5	Firmware flow.	61
4.6	Data collection setup	62
4.7	NO ₂ , O ₃ , and SO ₂ data collected by the designed UV spectroscopy-based sensor plotted against the reference data.	63
4.8	Cross-correlation between the NO ₂ , O ₃ , and SO ₂ data collected by the designed UV spectroscopy-based and the reference data.	64
5.1	Flow diagram of univariate approach.	68
5.2	Flow diagram of multivariate approach.	69
5.3	Designed data-smart IoT module.	73
5.4	Experimental setup of different prototypes.	73
5.5	Actual and reconstructed data collected from the cloud having overall RMSE 0.0004.	74
5.6	Plotting engine showing actual and reconstructed data plots with bandwidth saving.	76

List of Tables

3.1	Power consumption of on-board PM sensor	35
3.2	Performance comparison of on-board PM sensor	43
3.3	Energy saving of on-board PM sensor	43
3.4	Specification of the sensors	46
3.5	Different levels of air pollution monitoring parameters	48
3.6	Sensing error of the parameters	48
3.7	Performance comparison of APMD	49
3.8	Comparison between WiFi and NB-IoT	52
5.1	Unit cost of prototypes	72
5.2	Energy consumption comparison	75

List of Symbols

P	Number of parameters
F_{min}	Minimum frequency
F_{max}	Maximum frequency
$\mathcal{P}$	Parameter set
F_m^p	Maximum frequency of the p^{th} signal
F_s^p	Minimum sampling frequency
F_{smax}	Sampling frequency for all the P parameters
T_s	Sampling interval
ζ^p	Time slot to find temporal correlation for p^{th} parameter
ζ^{p*}	Optimum data collection interval for the p^{th} parameter
L	Optimum data collection interval of all the P parameters
$\mathcal{F}_m$	Set comprising the maximum frequency of the signals
$\mathcal{F}_s$	Set comprising the Nyquist sampling frequency
$\mathcal{L}$	Set comprising the optimum value of ζ^* for all the parameters
E_{batt}	Battery capacity of the node
$E_{batt}(n)$	Remaining energy of the battery at the n^{th} time instant
$E_{con}(n)$	Energy consumption of the device between $(n - 1)^{th}$ and n^{th} time instants
$E_h(n)$	Energy harvested between the $(n - 1)^{th}$ and n^{th} time instants
x_i	i^{th} sample
ψ	Matrix of size $n \times n$ representing the sparse basis matrix
n	Samples in a given batch of data
m	Randomly chosen samples for transmission
ϕ	Sensing matrix of size $m \times n$

List of Abbreviations

ADC	Analog-to-Digital Converter
AFE	Analog Front End
AMDC	Adaptive Multivariate Data Compression
AMI	Advanced Metering Infrastructure
APMD	Air Pollution Monitoring Device
CPCB	Central Pollution Control Board
DFT	Discrete Fourier Transform
eMTC	enhanced Machine-Type Communication
GPS	Global Positioning System
GPIO	General Purpose Input Output
GPRS	General Packet Radio Service
HCW	Hollow Core Waveguide
IoT	Internet of Things
ICT	information communication technology
IDE	Integrated Development Environment
LDO	Low Drop Out
LPWA	Low Power Wide Area
LED	Light Emitting Diode
MAPE	Mean Average Percentage Error
NB-IoT	Narrow Band- Internet of Things
NDIR	Non Dispersive Infrared
OS	Operating System

PCA	Principal Component Analysis
PM	Particulate Matter
PPM	Parts Per Million
PSM	Power Save Mode
PSD	Power Spectral Density
PWM	Pulse Width Modulation
QoS	Quality of Service
RMSE	Root Mean Squae Error
R-Pi	Raspberry-Pi
SG	Smart Grid
UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter
UV	Ultra Violet
WHO	World Health OrganiZation
WSN	Wireless Sensor Network