MILLIMETER WAVE ANTENNAS FOR BODY AREA NETWORK

SHAKTI SINGH CHAUHAN

CENTRE FOR APPLIED RESEARCH IN ELECTRONICS

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2022

MILLIMETER WAVE ANTENNAS FOR BODY AREA NETWORK

by

SHAKTI SINGH CHAUHAN

Centre for Applied Research in Electronics

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2022

DEDICATED

To

My Teachers, Family And Friends

CERTIFICATE

This is to certify that the work reported in this thesis entitled **"Millimeter Wave Antennas For Body Area Network"** being submitted by **Mr. Shakti Singh Chauhan** for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** to the Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India, is a record of original bonafide research work carried out by him under our guidance and supervision. The results contained in this thesis have not been submitted in part or full, to any other university or institute for the award of any degree or diploma.

We certify that he has pursued the prescribed course of research.

Prof. Mahesh P. Abegaonkar
Associate Professor
Centre for Applied Research
in Electronics (CARE)
Indian Institute of Technology Delhi,
New Delhi – 110016, India.

Prof. Ananjan Basu
Professor
Centre for Applied Research
in Electronics (CARE)
Indian Institute of Technology Delhi,
New Delhi – 110016, India.

ACKNOWLEDGEMENTS

First, I would like to thank my supervisors **Prof. Mahesh P. Abegaonkar** and **Prof. Ananjan Basu** for letting me be a part of the RF and Microwave Group, Centre for Applied Research in Electronics (CARE) IIT Delhi, and for giving me this opportunity to endeavour my research in the field of Millimeter Wave Antennas for Body Area Network. I would like to express my sincere thankfulness to my supervisors for their continuous support and guidance. I am thankful to them for contributing their valuable time and efforts to my personal and professional growth. Their wisdom and experience inspired me to traverse beyond my technical realisation.

I would also like to thank **Prof. Shibhan K. Koul** for being part of my research committee and providing his valuable technical input which help me to improve my work.

I also thank **Prof. Shouri Chatterjee** for his suggestions that have aided in my research development. I am grateful to **Prof. Arun Kumar** for chairing my research committee.

I would also like to thank **Prof. Kirti Dhwaj** for giving me his support as a part of CARE fraternity.

I would also like to thank **Prof. Djuradj Budimir** from the University of Westminster, London, UK to provide me an opportunity as an Visiting Student in his lab.

I am thankful to my colleagues here in the RF and Microwave group who have been a part of my Ph.D. journey. I would like to thank, **Dr. Sukomal Dey**, **Dr. Srujana Kagita**,

Dr. Ankita Malhotra, **Dr. Robin Kalyan**, **Dr. Saurabh Pegwal**, **Dr. Rajesh Kumar Singh**, **Dr. Anushruti Jaiswal**, **Dr. Deepika Sipal**, **Dr. Karthikeyan, Dr. Amit Kumar Singh**, **Dr. Harikesh, Santosh Kumar Bhagat**, **Rakhi, Sriparna, Priyansha Kaurav**, **Somia Sharma**, **Ratul, Shilpi, and Drishti** for their support and making this journey memorable. I would like to thank **Mr. Ashoke Pramanik** for their help in fabrication.

I would like to special thanks to **Nitesh Thapa, Dr. Zamir Wani, Dr. Ayushi Barthwal, Deepak Maikhuri, Pranav Kumar Shrivastava, and Ruchi Shrivastava** for their never-ending support during my entire journey.

I am also grateful to **Dr. Veerendra Dhyani, Dr. Vaibhav, Dr. Pratiksha, Akhil, John, Prabal, Sumit, and Pragyay** for their technical and non-technical discussions over a cup of tea.

I am grateful to all the teaching and office staff members from CARE, IIT Delhi for improving me throughout my Ph.D journey and keep me motivating in different ways for finishing my dissertation.

Finally, I would like to thank my parents, whose unconditional support and patience towards me motivate me throughout my life. I would also want to show my gratitude towards my brother **Satbeer** for his firm support. I will be forever grateful to them.

Shakti Singh Chauhan

ABSTRACT

The research work presented in this thesis is focused on the design and development of Millimeter Wave Antennas that can be used for Body Area Networks. And based on the requirements to set up a link between nodes used in Body Area Networks, different antenna configurations are presented.

First, a 3D printed lens antenna is proposed to be used for the off-body scenario. A lens is used in switched beam configuration in which three patches are used beneath the lens of diameter $3\lambda_0$. The lens integrated structure increases the gain of the patch antenna and the beam switching configuration helps in increasing the angular coverage of narrow beam radiation characteristics of the lens integrated patch. The beam direction of the presented structure will change with the change in patch excitation. Three beam directions that are 0° (center patch), +17° (left patch), and -21° (right patch) are achieved. The measured 10 dB overlapping bandwidth is from 57.27 GHz to 60 GHz and isolation better than 25 dB is achieved. The measured gain for the center patch is around 15.28 dBi. A flat skin phantom is used to estimate the effects of the change in antenna performance when placed in proximity of the human body. It is seen that the broadside antennas are not much affected by the flat skin phantom in terms of s-parameters, and its radiation characteristics. A single input waveguide-fed multi-beam antenna is also designed to be used in external nodes. The antenna radiates in three orthogonal directions and the gain of the antenna is increased by using the

3D printed lens. The measured impedance bandwidth is 1.7 GHz. The measured beam directions of the structure are 0°, 87°, and 270° at 57 GHz.

Two switched beam antenna configuration for on-body communication is also presented. In the first configuration, the main beam direction is tilted with the rotation of the dipole arm. The second radiating element is also used to incorporate the beam switching configuration. The tilted dipole arm (termed as common arm) of the structure is common to both of the radiating elements. The isolation between two elements is improved by increasing the width of the common arm and by etching out a semicircular shape in the common arm. The overlapping bandwidth for the structure is from 55 GHz to 64.1 GHz with the isolation better than 30 dB below 63.13 GHz. The directors are also used to enhance the gain for both radiators. The antenna will be able to communicate with two devices in two different directions. In the second configuration, pair of off-center directors are used to enhance the gain of the dipole structure. Three antenna elements are placed orthogonally sharing the common ground plane. The antenna will cover the directions 8°, 278°, and 87. The overlapping bandwidth for all three elements is from 55 GHz to 60 GHz. The effect on antenna parameters in the proximity of the flat skin phantom is studied at a gap of 5 mm between the antenna and the skin phantom. It can be seen that the radiation characteristics are mainly affected due to the reflections from the phantom.

A dual-mode antenna that can be used for both on-/off-body scenarios is designed. The higher-order mode microstrip ring is used for on-body mode and the coaxially located patch antenna is used for off-body mode. The overlapping bandwidth for both modes is 57 to 58.9 GHz with isolation of better than 30 dB for the entire range. Dual-beam characteristics are achieved for on-body mode with a beam direction of 30° and 339° at 58 GHz. The gain achieved in on-body mode is 9.5 dBi and for off-body mode is 6.7 dBi. When the antenna is placed over the flat skin phantom, the main beam direction changes in on-body mode due to the reflection from the flat skin phantom.

A vertically polarized antenna is presented for on-body propagation. The antenna uses a TM_{21} mode circular patch which is transformed into an end-fire radiating element. The circular patch is cut to quarter size and printed on both sides of the substrate. An electric wall is made at the edges of both the quarter patches with the conducting Vias while the curved edges are kept open to radiate in the end-fire way with E-field direction perpendicular with reference with the human body. The antenna is further loaded with a loop-like structure to improve the gain of the proposed structure. The measured impedance bandwidth of the antenna is from 56.84 GHz to 62.13 GHz. The end-fire radiation is achieved with vertical polarization for on-body applications. Antenna performance is also estimated using the flat skin phantom.

सार

इस थीसिस में प्रस्तुत शोध कार्य मिलीमीटर वेव ऐन्टेनास के डिजाइन और विकास पर केंद्रित है जिसका उपयोग बॉडी एरिया नेटवर्क के लिए किया जा सकता है। और बॉडी एरिया नेटवर्क में उपयोग किए जाने वाले नोड्स के बीच एक लिंक स्थापित करने की आवश्यकताओं के आधार पर, विभिन्न एंटीना कॉन्फ़िगरेशन प्रस्तुत किए गये है।

सबसे पहले, ऑफ-बॉडी परिदृश्य के लिए एक 3डी प्रिंटेड लेंस एंटीना का उपयोग करने का प्रस्ताव है। स्विच्ड बीम कॉन्फ़िगरेशन में एक लेंस का उपयोग किया गया है जिसमें $3\lambda_0$ व्यास के लेंस के नीचे तीन पैच का उपयोग किया गया है। लेंस एकीकृत संरचना पैच एंटीना के गेन को बढ़ाती है और बीम स्विचिंग कॉन्फ़िगरेशन लेंस एकीकृत पैच की संकीर्ण बीम विकिरण विशेषताओं के कोणीय कवरेज को बढ़ाने में मदद करता है। प्रस्तुत संरचना की बीम दिशा पैच उत्तेजना में परिवर्तन के साथ बदल जाएगी। तीन बीम दिशाएँ जो 0° (केंद्र पैच), + 17° (बाएँ पैच), और -21° (दायाँ पैच) हैं, प्राप्त की गयी हैं। मापा गया 10 डीबी ओवरलैपिंग बैंडविड्थ 57.27 गीगाहर्ट्ज़ से 60 गीगाहर्ट्ज़ तक है और 25 डीबी से बेहतर अलगाव हासिल किया गया है। केंद्र पैच के लिए मापा गेन लगभग 15.28 dBi है।

मानव शरीर की निकटता में रखे जाने पर एंटीना के प्रदर्शन में परिवर्तन के प्रभावों का अनुमान लगाने के लिए एक सपाट स्किन फैंटम का उपयोग किया गया है। यह देखा गया है कि ब्रॉडसाइड एंटेना एस-पैरामीटर और इसकी विकिरण विशेषताओं के संदर्भ में फ्लैट स्किन फैंटम से ज्यादा प्रभावित नहीं होते हैं। एक एकल इनपुट वेवगाइड-फेड मल्टी-बीम एंटीना को बाहरी नोड्स में उपयोग करने के लिए भी डिज़ाइन किया गया है। एंटीना तीन ओर्थोगोनल दिशाओं में विकिरण करता है और 3 डी प्रिंटेड लेंस का उपयोग करके एंटीना का गेन बढ़ाया गया है। मापा इम्पीडेंस बैंडविड्थ 1.7 गीगाहर्ट्ज़ है। 57 गीगाहर्ट्ज पर संरचना के मापा बीम दिशाएं 0 डिग्री, 87 डिग्री और 270 डिग्री हैं।

ऑन-बॉडी संचार के लिए दो स्विच्ड बीम एंटीना कॉन्फ़िगरेशन भी प्रस्तुत किया गया है। पहले विन्यास में, मुख्य बीम दिशा डाई-पोल भुजा के घूर्णन के साथ घूम जाती है। दूसरे विकिरण तत्व का उपयोग बीम स्विचिंग कॉन्फ़िगरेशन को शामिल करने के लिए भी किया गया है। संरचना की घूमी हुई डाई-पोल भुजा (सामान्य भुजा कहलाती है) दोनों विकिरण तत्वों के लिए समान है। सामान्य भुजा की चौड़ाई बढ़ाकर और सामान्य भुजा में अर्धवृत्ताकार आकृति बनाकर दो तत्वों के बीच अलगाव में सुधार किया गया है। संरचना के लिए ओवरलैपिंग बैंडविड्थ 55 गीगाहर्ट्ज़ से 64.1 गीगाहर्ट्ज़ तक है और आइसोलेशन 63.13 गीगाहर्ट्ज़ से नीचे, 30 डीबी से बेहतर है। दोनों रेडिएटर्स के गेन को बढ़ाने के लिए डायरेक्टर्स का भी उपयोग किया गया है। एंटीना दो अलग-अलग दिशाओं में दो उपकरणों के

साथ संचार करने में सक्षम है। दूसरे विन्यास में, डाई-पोल संरचना के गेन को बढ़ाने के लिए ऑफ-सेंटर डायरेक्टर्स की जोड़ी का उपयोग किया गया है। तीन एंटेना तत्वों को कॉमन ग्रॉउंड प्लेन को साझा करते हुए ओर्थोगोनली रखा गया है। एंटीना 8°, 278° और 87° दिशाओं को कवर करेगा। तीनों तत्वों के लिए ओवरलैपिंग बैंडविड्थ 55 गीगाहर्ट्ज़ से 60 गीगाहर्ट्ज़ तक है। फ्लैट स्किन फैंटम की निकटता में एंटीना मापदंडों पर प्रभाव का अध्ययन एंटीना और स्किन फैंटम के बीच 5 मिमी के अंतराल पर किया गया है। यह देखा जा सकता है कि फैंटम से परावर्तन के कारण विकिरण विशेषताएँ मुख्य रूप से प्रभावित होती हैं।

एक ड्यूल-मोड एंटेना जिसे ऑन/ऑफ-बॉडी परिदृश्य दोनों के लिए उपयोग किया जा सकता है, डिज़ाइन किया गया है। उच्च-क्रम मोड माइक्रोस्ट्रिप रिंग का उपयोग ऑन-बॉडी मोड के लिए किया गया है और समाक्षीय रूप से स्थित पैच एंटीना का उपयोग ऑफ-बॉडी मोड के लिए किया गया है। दोनों मोड के लिए ओवरलैपिंग बैंडविड्थ 57 से 58.9 गीगाहर्ट्ज़ है और पूरी रेंज के लिए 30 डीबी से बेहतर आइसोलेशन है। 58 गीगाहर्ट्ज़ पर 30° और 339° की बीम दिशा के साथ ऑन-बॉडी मोड के लिए ड्यूल बीम विशेषताओं को प्राप्त किया गया है। ऑन-बॉडी मोड में प्राप्त गेन 9.5 dBi है और ऑफ-बॉडी मोड के लिए 6.7 डी बी आई है। जब ऐन्टेना को फ्लैट स्किन फैंटम के ऊपर रखा जाता है, तो फ्लैट स्किन फैंटम से परावर्तन के कारण ऑन-बॉडी मोड मे मुख्य बीम दिशा बदल जाती है।

शरीर पर प्रसार के लिए एक वर्टीकल पोलोरिसेड एंटीना प्रस्तुत किया गया है। एंटीना TM_{21} मोड सर्कुलर पैच का उपयोग करता है, जो एक एन्ड-फायर विकिरण एलिमेंट में बदल दिया गया है। गोलाकार पैच को चौथाई आकार में काटा गया है और सब्स्ट्रेट के दोनों साइड्स पर प्रिंट किया गया है। कंडक्टिंग वायस के साथ दोनों क्वार्टर पैच के किनारों पर एक इलेक्ट्रिक वाल बनाई गयी है, जबकि घुमावदार किनारों को मानव शरीर के संदर्भ में ई-फील्ड दिशा लंबवत के साथ एन्ड-फायर तरीके से विकिरण के लिए खुला रखा गया है। प्रस्तावित संरचना के गेन को बेहतर बनाने के लिए एंटीना को आगे लूप जैसी संरचना के साथ लोड किया गया है। एंटीना की मापित इम्पीडेन्स बैंडविड्थ 56.84 गीगाहर्ट्ज़ से 62.13 गीगाहर्ट्ज़ तक है। एन्ड-फायर विकिरण ऑन-बॉडी अनुप्रयोगों के लिए वर्टीकल ध्रुवीकरण के साथ प्राप्त किया गया है। फ्लैट त्वचा फैंटम का उपयोग करके एंटीना के प्रदर्शन का भी अनुमान लगाया गया है।

TABLE OF CONTENT

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

LIST OF ABBREVIATIONS

Abbreviations	Definitions
BCCs	Body Centric Communications
IoT	Internet of Things
AR	Augmented Reality
BAN	Body Area Network
RF	Radio Frequency
VR	Virtual Reality
WBAN	Wireless Body Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
FSPL	Free Space Path Loss
PIFA	Planar Inverted F Antenna
UWB	Ultra-Wideband antennas
PCB	Printed Circuit Board
PLA	Poly Lactic Acid

FDM	Fused Deposition Modelling
SLL	Sidelobe Level
PNA	Performance Vector Analyzer
TM	Transverse Magnetic
SIW	Substrate Integrated Waveguide
PTH	Plated Through Holes
ECAL	Electronic Calibration