

छिद्र युग्मित दोहरी बैंड आयताकार परावैद्युत गुंजयमान यंत्र एंटीना का विश्लेषण

Analysis of Aperture Coupled Dual Band Rectangular Dielectric Resonator Antenna

अलीना खान¹, सोवन मोहंती² एवं बैबस्वत महापात्र³

^{1, 2} एस.आर.एम.एस. कॉलेज ऑफ इंजीनियरिंग और प्रौद्योगिकी, बरेली, यू.पी., भारत

³ गलगोटियास विश्वविद्यालय, ग्रेटर नोएडा, यू.पी., भारत

¹alinakhan2612@gmail.com ²mohanty.sovan@gmail.com ³bmohapatra9@gmail.com

¹+91-8375978352, ²+ 91-9458705053, ³+91-9810890457

सारांश

यह पेपर चीजों के संकरी इंटरनेट (Internet of Things) और संवर्धित मोबाइल ब्रॉडबैंड अनुप्रयोगों के लिए एक छिद्र युग्मित (Aperture coupled) दोहरे-बैंड आयताकार परावैद्युत गुंजयमान यंत्र एंटीना (Rectangular DRA) प्रस्तुत करता है। यह डिजाइन किया गया रेडिएटर 3.79 GHz पर -10dB प्रतिबाधा बैंडविड्थ (Impedance Bandwidth) के साथ 97.62% की आवृत्ति रेंज में बैंड-I के लिए 3.41 से 3.97 गीगाहर्ट्ज पर और 5.09 गीगाहर्ट्ज की प्रतिध्वनि आवृत्ति के साथ 16.09% से 4.39 गीगाहर्ट्ज से 5.20 गीगाहर्ट्ज तक बैंड II के लिए प्रतिध्वनित होता है। यह छोटा आकार डिजाइन नगण्य सतह की लहर (negligible surface wave) और ओमिक नुकसान के कारण 97.626% की विकिरण दक्षता (Radiation Efficiency) प्रदान करता है। आउटपुट विकिरण विशेषताओं में 3.8291 dBi का शिखर लाभ, युक्त क्रॉस एवं को ध्रुवीकरण (Cross-Polarization) के साथ 3.9222 dB की शिखर तीव्रता विकिरण (Directivity) प्रदान करता है।

ABSTRACT

This paper presents an aperture coupled dual-band rectangular dielectric resonator antenna for narrowband internet of things and enhanced mobile broadband applications- This designed radiator is resonating at 3.79 GHz with -10dB impedance bandwidth of 97.62% in the frequency range from 3.41 to 3.97 GHz for band-I and resonating frequency of 5.04 GHz with impedance bandwidth of 16.09% from 4.39 GHz to 5.20 GHz for band-II. This miniaturized design provides a radiation efficiency of 97.626% due to negligible surface wave and ohmic losses. The output radiation characteristics constitute a peak gain of 3.8291 dBi, directivity 3.9222 dB with the desired cross, and co-polarization.

विषय बोधक शब्द – आयताकार परावैद्युत गुंजयमान यंत्र एंटीना (आरडीआरए), संशोधित परावैद्युत वेवगाइड मॉडल (डीडब्ल्यूएम), इंटरनेट ऑफ थिंग्स (आई ओ टी)।

Keywords - Rectangular Dielectric Resonator Antenna (RDRA), Modified Dielectric Waveguide Model (MDWM), Internet of Things (IoT).

परिचय

1939 में रॉबर्ट डी रिचमेयर ने दिखाया कि परावैद्युत सिरेमिक सामग्री एक स्थिर गुंजयमान यंत्र (stable resonating structure) के रूप में व्यवहार कर सकती है और उनका नाम परावैद्युत अनुनादक [1] (Dielectric Resonator) रखा जा सकता है। उसके तुरंत बाद, 1960 में ओकाया और बाराश ने पाया कि शुद्ध “रूटाइल” [2] (Rutile: crystalline dielectric material) जिसके एक टुकड़े में अशुद्धियों की मात्रा लगभग 0.001% से कम होती है, और जिसका उच्च डाइइलेक्ट्रिक स्थिर (dielectric constant) लगभग 100 है, धातु की दीवारों वाली गुहा अनुनादक (metallic walled cavity resonator) [3] से अधिक अनलोड क्यू कारक (Q-factor) के साथ माइक्रोवेव अनुनादक (microwave resonator) के रूप में व्यवहार करता है। उन्होंने यह भी पाया कि वे केवल इन्फ्रारेड क्षेत्र [4] में गिरने से उच्चतम रेडियो फ्रीक्वेंसी के माध्यम से लगातार स्थिर रहे। परावैद्युत अनुनादक एंटेना (DRA) के प्रारंभिक सिद्धांत का अध्ययन भी उनके द्वारा किया गया था [1] जिसके बाद 1980 में एस. ए. लॉन्ग ने दिखाया कि ये डीआरए कुशल धात्विक एंटेना की तुलना में अत्यधिक कुशल रेडिएटर बन सकते हैं और इसका उपयोग एंटीना तत्वों [1] के रूप में किया जा सकता है। इसमें महत्वपूर्ण नुकसान केवल परावैद्युत सामग्री में खामियों (dielectric material losses) के कारण है, जो काफी कम है। डीआरए लघुकृत ढांचा प्रदान करता है। इसमें उपयुक्त दिशात्मक विकिरण पैटर्न (directional radiation pattern) को उत्तेजित करने के लिए विभिन्न अनुपातों को पहलू अनुपात के परिवर्तन द्वारा आसानी से उत्तेजित किया जा सकता है। डीआरए के कई आकारों पर शोध किया गया जैसे आयताकार, बेलनाकार, शंखाकार, गोलाकार और संकर संरचना, आदि, जिसमें से आयताकार डीआरए को इसकी बेहतर विशेषताओं के कारण चुना गया है जैसे: दो स्वतंत्र पहलू अनुपात, जो उच्च स्तर की संरचना को बढ़ाते हैं, डिजाइन लचीलापन, इसके अलावा, यह कुछ निचले क्रम के मोड का भी समर्थन करता है, जिसके परिणाम स्वरूप कम क्रॉस-ध्रुवीकरण स्तर (low level of cross polarization) [5] होता है। माइक्रोस्ट्रिप पैच एंटीना के प्रकार डीआरए के साथ लगभग सभी फीडिंग तकनीकों का उपयोग किया जा सकता है। यहाँ सरल माइक्रो-स्ट्रिप फीडिंग का उपयोग छिद्र युग्मन (aperture coupling) के साथ सहसंबंध में किया गया है। कुशल मिलान के साथ, युग्मन गुणांक (coupling coefficient) लगभग 1 के करीब हो जाता है और विकिरण के प्रदर्शन में सुधार के लिए महसूस किया जा सकता है। Ansys एचएफएसएस 14.0 (High Frequency Structural Simulator) सॉफ्टवेयर जो परिमित तत्व विधि (Finite Element Method) पर आधारित है, का उपयोग इस परियोजना के पूर्ण-लहर विश्लेषण (full wave analysis) के लिए किया जाता है [6]।

प्रस्तावित एंटीना डिजाइन

इस शोधपत्र में संशोधित खुदी हुई साइडवॉल (etched sidewall) आयताकार डीआरए प्रस्तावित है। यहां बेहद संकीर्ण अपर्चर युग्मन (narrow aperture coupling) त्रुटिहीन प्रतिबाधा मिलान (impedance matching) के साथ सहसंबंध में प्रयोग किया गया है। यह रेडिएटर के वांछित विकिरण पैटर्न (desired radiation pattern) और समग्र आउटपुट विशेषताओं के लिए कैपेसिटिव युग्मन (capacitive coupling) शुरू करता है।

प्रस्तावित एंटीना की संरचना चित्र 1ए, बी और सी में दिखाई गई है। संशोधित आरडीआरए संरचना के लिए संख्यात्मक तकनीकों (numerical techniques) को विकसित करने में शामिल आलोचना के कारण यहां अनंत ग्राउंड प्लेन (infinite ground plane) के साथ संशोधित डीडिब्ल्यूएम (Dielectric Waveguide Model) का उपयोग किया जाता है। गणना की गई संरचना के मौलिक आयाम को संदर्भ मॉडल के रूप

में लिया गया है तथा वांछित गुंजावृत्ति प्राप्त करने और विकिरण क्यू-फैक्टर को प्रतिध्वनित करने के लिए कुछ अनुमानित भिन्नता लागू की गयी है [7]। आयताकार डीआरए का विकिरण क्यू-फैक्टर (radiation Q-factor) उसके संग्रहित ऊर्जा (stored energy) एवं विकिरण क्षमता (radiated power) पे निर्भर करता है, जो के इस प्रकार दिया गया है :

$$Q = \frac{2\omega W_e}{P_{rad}} \dots\dots\dots(1.1)$$

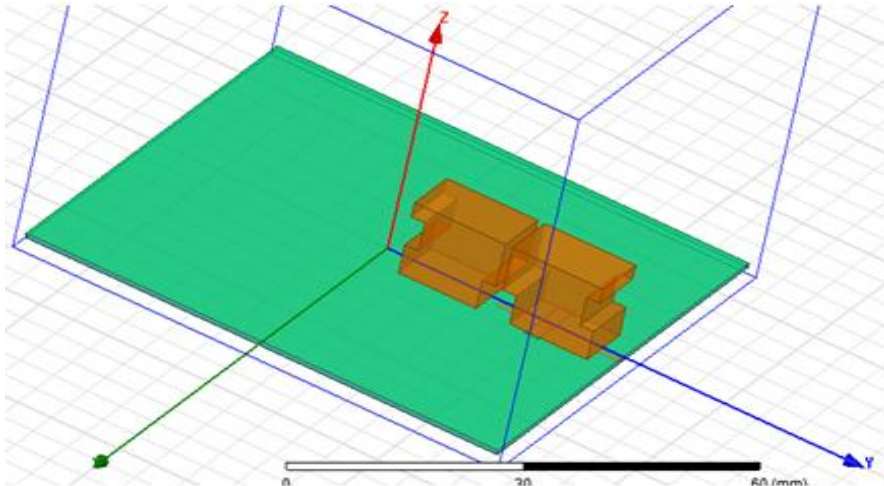
संग्रहित ऊर्जा (stored energy) को इस सूत्र से निकाल सकते हैं:

$$W_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r abd}{32} \left(1 + \frac{\sin(k_z d)}{k_z d} \right) (k_x^2 + k_y^2) \dots\dots\dots(1.2)$$

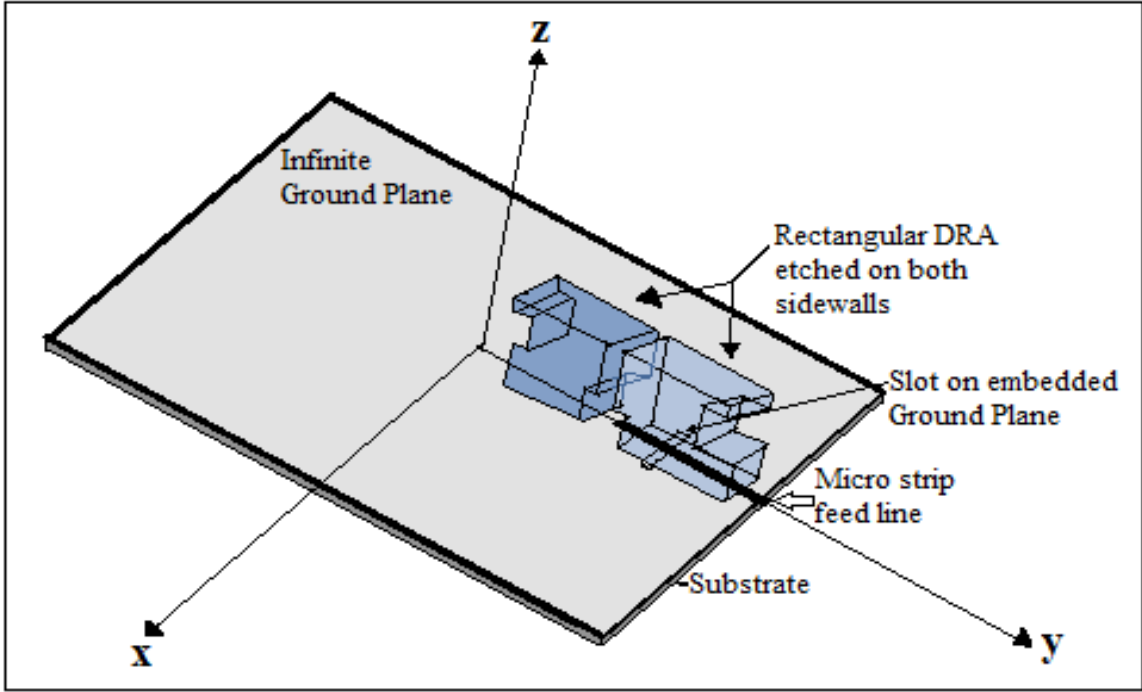
विकिरण क्षमता (radiated power) एन्टेना के आयाम पे भी निर्भर करता है। इन योगों के कारण हम कह सकते हैं कि एंटीना के आयाम के साथ-साथ शक्ति की सीमा महत्वपूर्ण हो जाती है। जैसा कि इस सूत्र में दिया गया है:

$$P_{rad} = 10k_o^4 \left| \frac{-j\omega 8\epsilon_o(\epsilon_r - 1)}{k_x k_y k_z} \sin\left(\frac{k_z d}{2}\right) \right|^2 \hat{z} \dots\dots\dots(1.3)$$

यहाँ, ϵ_0 = हवा की पारगम्यता (permittivity of air), ϵ_r = सापेक्ष पारगम्यता (relative permittivity), a, b, d = एन्टेना के आयाम, k_x, k_y, k_z = x-, y- एवं z- दिशा में लहर संख्या (wave number), k_o = निर्बाध लहर संख्या (free-space wave number) को लक्षित करते हैं।



चित्र 1 ए: Ansys HFSS 14.0 में स्लॉट युग्मन के साथ आयताकार डीआरए का 3-आयामी दृश्य
(Fig. 1a. 3-D view of aperture coupled RDRA in Ansys HFSS 14.0 simulation software)

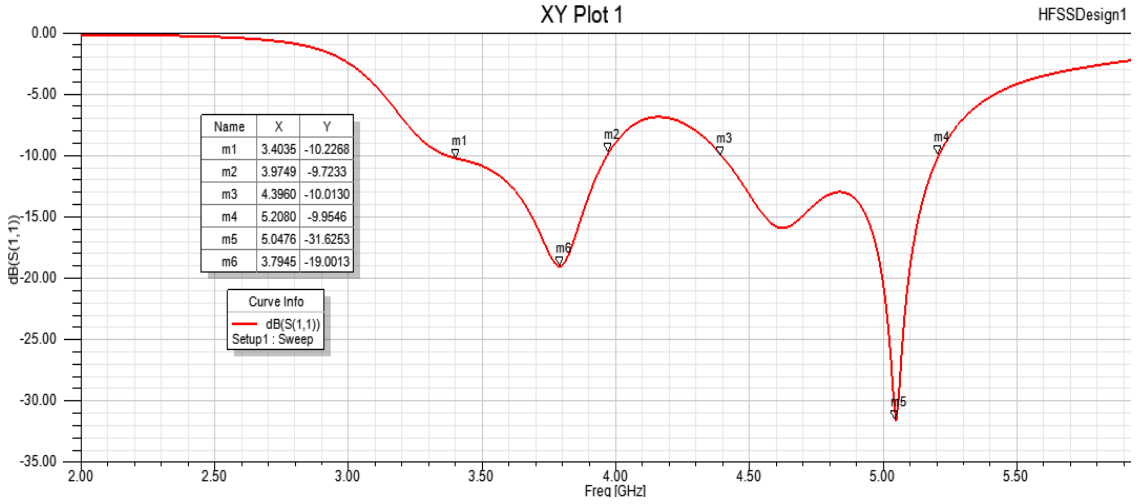


चित्र 1 बी : छिद्र युग्मित धातुई पैच फीडिंग के साथ आयताकार डीआरए का साइड व्यू

(Fig. 1b. Side view of aperture coupled metallic patch fed RDRA)

इसमें शामिल डिजाइन चरण इस प्रकार हैं: Arlon25N™ मटेरियल का एक सब्सट्रेट लिया गया जिसका आयाम $70 \times 70 \times 0.6 \text{ mm}^3$ है, हानि स्पर्शरेखा (loss tangent) 0.0025 है और परावैद्युतांक (material permittivity) 3.38 है। अनंत ग्राउंड प्लेन का उपयोग सब्सट्रेट के ऊपरी सतह पर किया गया जिससे कि भौतिक ऊंचाई को आधा करने, ब्रॉडसाइड विकिरण पैटर्न का एहसास कराने तथा छवि सिद्धांत लागू करने के लिए उपयोगी बनाया जा सके। सब्सट्रेट की निचली सतह पर $1.15 \times 18.5 \text{ mm}^2$ की माइक्रोस्ट्रिप ट्रांसमिशन लाइन को xy प्लेन पर बनाया गया। फिर ग्राउंड प्लेन पर बहुत ही छोटे आयाम $10 \times 2 \text{ mm}^2$ का एक अपर्चर बनाया गया (जैसा कि चित्र 1 सी में दिखाया गया है) ताकि ऊर्जा स्रोत से विकिरण संरचना के लिए युग्मित किया जा सके। पीछे के रेडिएशन को कम करने के लिए अपर्चर का आकार बेहद छोटा होना चाहिए हालांकि, इसे इतना छोटा भी ना बनाया जाय कि इसमें वांछित निर्माण सहिष्णुता ना हो सके, जो अनावश्यक इवेनरसेंट मोड को उत्तेजित कर सकती है। सापेक्ष परावैद्युतांक 20 के साथ एमडीआर-20 (Mg-Ca-Ti) मुख्य संशोधित आरडीआरए के लिए डाइइलेक्ट्रिक सामग्री के रूप में उपयोग किया गया है। इसके संदर्भ आयाम की गणना एल्डो पेटोसा [7] द्वारा डाइइलेक्ट्रिक अनुनादक एंटीना हैंडबुक के पृष्ठ संख्या 42 से संशोधित तरंग मॉडल का उपयोग करके की गई है। डाइइलेक्ट्रिक का अनुकूलित आयाम $9 \times 13.9 \times 10 \text{ mm}^3$ है जो कि दाएं और बाएं दोनों तरफ से एक दूसरे की दर्पण छवि होने के नाते नक्काशीदार किए गए हैं। $z = 0 \text{ mm}$ और $z = 4 \text{ mm}$ की ऊंचाई से क्रमशः 4 mm की नक्काशी की गई है। डिजाइन Ansys एचएफएसएस सिमुलेशन सॉफ्टवेयर पर किया गया है जैसा कि चित्र 1 ए में दिखाया गया है।

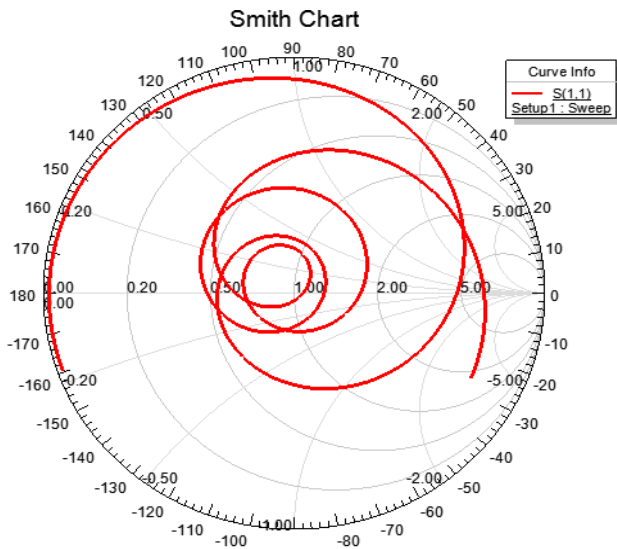
परिणाम विश्लेषण



चित्र 2. प्रतिबिंब गुणांक (S11 in dB) बनाम आवृत्ति प्लॉट
(Fig. 2. Reflection Coefficient versus Frequency plot)

-10 dB के नीचे दो गुँजावृत्ति (resonant frequency) प्राप्त होती है क्रमशः 3.79 गीगा हर्ट्ज 3.41 से 3.97 गीगा हर्ट्ज (बैंड-I) तक तथा 5.04 गीगा हर्ट्ज 4.3960 से 5.2080 गीगा हर्ट्ज (बैंड-II) तक। इस निर्माण का उपयोग करके प्रतिबाधा बैंडविड्थ की गणना की जाती है:

$$3 \text{ dB Impedance BW (\%)} = 2 \times \frac{f_{\text{upper edge}} - f_{\text{lower edge}}}{f_{\text{resonance}}} \times 100$$



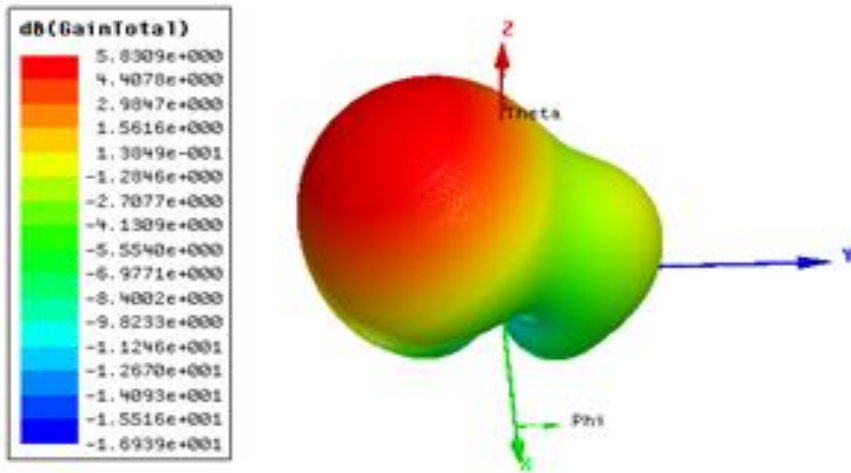
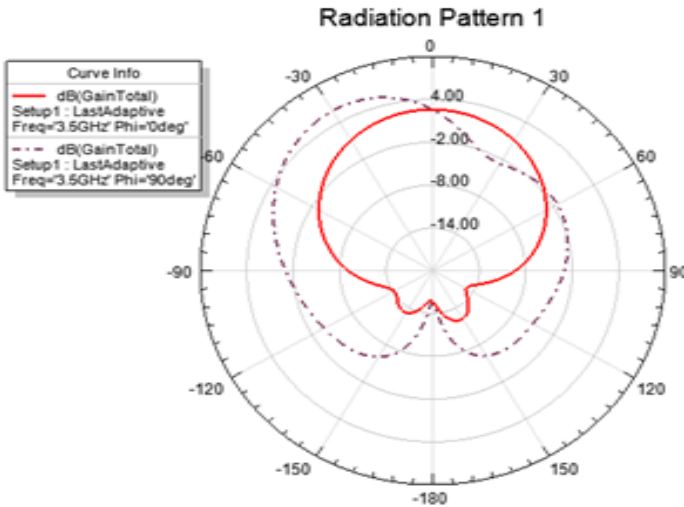
चित्र 3. आरडीआरए संरचना का स्मिथ चार्ट प्लॉट
(Fig. 3. Smith Chart plot of the concerned RDRA)

बैंड-I के लिए 97.62% और बैंड-II के लिए 16.09% प्रतिबाधा बैंडविड्थ पाई गई है। यह दोहरी वाइडबैंड प्रतिक्रिया दोनों डीआरए द्वारा उत्पादित दो विकिरण क्षेत्रों (radiating fields) के उगमन के कारण हैं। दोनों डीआरए को एक ही स्रोत से फीड किया गया है लेकिन स्पेस और समय के अंतर (space-time difference) की वजह से स्थानिक चरण विवादिक (spatial altercation) पाया गया। यह समग्र विकिरण संरचना की बाधा प्रतिक्रिया (impedance response) को व्यापक बनाएगा। जिसके कारण एक ही एंटीना दो अलग आवृत्तियों में आवेदन पाता है।

चित्र 3 संशोधित आरडीआरए संरचना के इनपुट टर्मिनल पर परिणामी स्मिथ चार्ट दिखाता है। यह पाया गया है कि 3.79 गीगाहर्ट्ज और 5.04 गीगाहर्ट्ज की गूंज पर इनपुट टर्मिनल प्रतिरोधी (resistive) हो जाता है। इस आवृत्ति पर, अधिकतम शक्ति स्रोत (maximum power transfer) से एंटीना को वितरित की जाएगी। यह देखा गया है कि इनपुट टर्मिनल पर कैपेसिटिव कपलिंग पर प्रेरक युग्मन (inductive coupling) हावी है। yz और xz विमान में विद्युत् और चुंबकीय क्षेत्र के उत्पादन विकिरण को चित्र 4 में दर्शाया गया है। 3.5 गीगाहर्ट्ज पर अजीमुथ कोण क्रमशः 0 डिग्री और 90 डिग्री के रूप में लिया गया है। क्रॉस ध्रुवीकरण (cross-polarization) के प्रभाव को कम करने के लिए इस एंटेना डिजाइन का सफलतापूर्वक उपयोग -30 डिग्री से -150 डिग्री के बीच में हो सकता है। चित्र 5 संरचना के लाभ पैटर्न के 3 डी आउटपुट ध्रुवीय भूखंड को

इंगित करता है। यह 3.82 डीबी का अधिकतम लाभ परिणाम दिखाता है। परिणामी एंटेना मापदंडों को तालिका 1 में दिखाया गया है। यह देखा गया है कि उच्च लाभ 97.726% की उच्च दक्षता और क्रमशः 3.8291dBi और 3.9222dB की चरम प्रत्यक्षता के साथ प्राप्त की जाती है।

चित्र 4. yz और xz विमान में विद्युत् क्षेत्र और चुंबकीय क्षेत्र की साजिश (Fig. 4. Plot of the Electric and Magnetic field in the yz and xz plane)



चित्र 5. तीन आयामी लाभ पैटर्न का ध्रुवीय भूखंड प्लॉट (Fig 5. 3-Dimensional Gain Plot)

तालिका 1. परिणामी एंटीना पैरामीटर

एंटीना पैरामीटर		
अधिकतम तीव्रता	(Maximum Intensity)	0.27966 W/Sr
शिखर तीव्रता विकिरण	(Peak Directivity)	3.9222 dBi
अधिकतम लाभ	(Peak Gain)	3.8291 dBi
विकिरण छमता	(Radiated Power)	0.89603 W
स्वीकृत छमता	(Accepted Power)	0.91782 W
घटना छमता	(Incident Power)	1 W
विकिरण दक्षता	(Radiation Efficiency)	0.97626
फ्रंट टू बैक रेशियो	(Front-to-Back Ratio)	16.079

निष्कर्ष

छिद्र युग्मित दोहरी बैंड आयताकार परावैद्युत गुंजयमान यंत्र एंटीना को 97.62% और 16.09% प्रतिबाधा बैंडविड्थ के साथ सफलतापूर्वक डिजाइन किया गया है, जिसमें तुलनात्मक रूप से उचित पीक गेन 3.82 डीबीआई और विकिरण दक्षता 97.62% है। डिजाइन की गई संरचना में डुअल बैंड ऑपरेशंस दिखाई देता है, जो बैंड-I (3.41 से 3.97 गीगा हर्ट्ज तक) और बैंड-II (3.79 और 5.04 गीगाहर्ट्ज तक) अपनी लघुकृत संरचना के साथ यह एंटीना आधुनिक उच्च गति संकीर्ण इंटरनेट चीजों (in the frequency range of 5GHz and above ISM band) और मोबाइल ब्रॉडबैंड अनुप्रयोगों ((example: WiMAX operating in the range of 3.4 to 3.6 GHz) के लिए उपयुक्त है। सुधार के लिए कुछ गुंजाइश हैं: पहलू अनुपात को संशोधित करके, प्रतिबाधा बैंडविड्थ और बदले पैटर्न बैंडविड्थ में और सुधार किया जा सकता है। इन दो परावैद्युत एंटीना के बीच पारस्परिक युग्मन को विकिरण दक्षता में सुधार करने के लिए और बढ़ाया जा सकता है। युग्मन पोर्ट और विकीर्ण संरचना के बीच अधिकतम शक्ति हस्तांतरण के लिए महत्वपूर्ण युग्मन को सीमांत बनाया जा सकता है।

तालिका 2. एंटीना शब्दावली

Terminologies in English	हिंदी की शब्दावली
Aperture Coupled	छिद्र युग्मन
Accepted power	स्वीकृत छमता
Bandwidth Efficiency	प्रतिबाधा बैंडविड्थ
Dielectric	परावैद्युत
Incident power	घटना छमता
Internet of Things (IoT)	चीजों के इंटरनेट
Max Intensity	अधिकतम तीव्रता

Peak directivity	शिखर तीव्रता विकिरण
Peak gain	अधिकतम लाभ
Radiation Efficiency	विकिरण दक्षता
Radiated power	विकिरण छमता
Rectangular	आयताकार
Resonator	गुंजयमान यंत्र

संदर्भ (References)

1. *Developments at Milli.meter wave frequencies*, International Journal of Antennas and Wave Propagations © 2016.

2. Ansoft Corporation, Four Station Square, Pittsburg, PA. (2000). [Online]. Available: <http://www.ansoft.com>.
3. A. Petosa, *Dielectric Resonator Antenna Handbook*, Norwood, M.A.: Artech House Publishers, 2007.
4. S. Mohanty, A. Khan and B. Mohapatra, *Embedded Rectangular Dielectric Resonator Antenna for Ku Band Applications*, 21 Feb 2020. SSRN. <https://ssrn.com/abstract=3549250> and <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3549250>.
5. S. Mohanty, A. Khan, B. Mohapatra, *Comparative Analysis of Stacked Rectangular Dielectric Resonator Antennas Based on Finite Defected Ground Plane*, 21 Feb 2020, SSRN, <https://ssrn.com/abstract=3551000> and <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3551000>.
6. I. Ali, M. H. Jamaluddin, A. Gaya and H. A. Rahim, *A Dielectric Resonator Antenna with Enhanced Gain and Bandwidth for 5.G Applications*, Sensors 2020, 20, 675; doi: 10.3390/s20030675.
7. S. Fakhte, H. Oraizi, and L. Matekovits, *Gain Improvement of Rectangular Dielectric Resonator by Engraving Grooves on its Side*, Print ISSN: 1536.1225, doi: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2702584> (c) 2016 IEEE.
8. R. S. Yaduvanshi and H. Parthasarathy, *[Rectangular Dielectric Resonator Antennas Theory and Design]* Springer ISBN 978.81.322.2499.0 ISBN 978.81.322.2500.3 (eBook) DOI 10.1007/978.81.322.2500.3 Springer New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London © Springer India 2016.
9. M. Ben Omar and A. Matoussi, *Dielectric and conductivity investigations of Rutile Titanium dioxide single crystals*, 978.1.4673.1252.3/12/\$31.00 ©2012 IEEE.
10. A. Okaya, L. F. Barash, *The Dielectric Microwave Resonator*, Proceedings of the IRE, pg num 1962.2092.
11. Okaya, et al., Columbia Radiation Lab. Quart. Rept., Columbia University, New York, March 16. Julnie 15, 1959 (unpublished), June 16. September 15, 1959 (unpublished), September 16. December 15, 1959 (unpublished).
12. S. Keyrouz, D. Caratelli, *Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter. Wave Frequencies*, International Journal of Antennas and Propagation© 2016.
13. G. D. Loos and Y. M. M. Antar, *[A new aperture. coupled rectangular dielectric resonator antenna array.]* Microw. and Opt. Techn. Lett., vol. 7, pp. 642.644, Oct. 1994
14. K. Y. Chow, K. W. Leung, K. M. Luk and E. K. N. Yung, *[Cylindrical dielectric resonator antenna array.]* Electron. Lett., vol. 31, pp. 1536.1537, Aug. 1995
15. K. W. Leung, H. Y. Lo, K. M. Luk and E. K. N. Yung, *[Two dimensional cylindrical dielectric resonator antenna array.]* Electron Lett., vol. 34, No. 13, pp. 1283.1285, June 1998
16. G. Drossos, Z. Wu and L. E. Davis, *[Aperture. coupled cylindrical dielectric resonator antennas forming four.element linear arrays.]* Microw. and Opt. Techn. Lett., vol. 20, pp. 151.153, Jan. 1999
17. A. Petosa, R. K. Mongia, A. Ittipiboon and J. S. Wight, *[Design of microstrip.fed series array of dielectric resonator antennas.]* Electron. Lett., vol. 31, pp. 1306.1307, Aug. 1995
18. A. Petosa, A. Ittipiboon, M. Cuhaci and R. Larose, *[Bandwidth improvement for a microstrip.fed series array of dielectric resonator antennas.]* Electron. Lett., vol. 32, pp. 608.609, Mar. 1996
19. R. Chair, S. L. S. Yang, A. A. Kishk, K. F. Lee, and K. M. Luk, *[Aperture Fed Wideband Circularly Polarized Rectangular Stair Shaped Dielectric Resonator Antenna]*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 54, No. 4, April 2006.
20. Y. X. Guo, K. M. Luk and K. W. Leung, *[Mutual coupling between rectangular resonator antennas by FDTD]*, IEE Proe. . Microwave Antennas Propagation., Vol. 146, No. 4, August 1999
21. M. R. Nikkhah, A. A. and J. R. Mohassel, *[Wideband DRA Array Placed on Array of Slot Windows]*, DOI: 10.1109/TAP.2015.2490246, 0018.926X (c) 2015 IEEE.