

Design of the Triple Photonic Crystal Fractal Slot Array Antenna

Bin Lin

School of Information Science and Technology, Xiamen University Tan Kah Kee College, Zhangzhou Fujian
Email: linbin@xujc.com

Received: Nov. 8th, 2019; accepted: Nov. 22nd, 2019; published: Nov. 29th, 2019

Abstract

According to the performance requirements of the antennas for the multi-band compatible mobile communication system and RFID system, a novel triple photonic crystal antenna is proposed creatively, and combined with the cross fractal slot array structure, a triple photonic crystal fractal slot array antenna is designed, and the antenna samples are made and tested. According to the test results of antenna samples, this antenna can work in the frequency bands of the 2G, the 3G, the 4G and the 5G mobile communication system and three working frequency bands of RFID system at the same time, and has a large working bandwidth and strong radiation power in each working frequency band. This antenna has high stable radiation characteristics in all working frequency bands and is expected to be used in mobile phones with RFID reader and writer functions.

Keywords

Triple Photonic Crystal Antenna, Fractal Slot Structure, Cross Fractal Slot Array Structure, Mobile Communication System, RFID System

三重光子晶体分形缝隙阵列天线的设计

林斌

厦门大学嘉庚学院, 信息科学与技术学院, 福建 漳州
Email: linbin@xujc.com

收稿日期: 2019年11月8日; 录用日期: 2019年11月22日; 发布日期: 2019年11月29日

摘要

本文针对多频段兼容移动通信系统和RFID系统对天线的性能要求, 创造性地提出了一种新型三重光子晶体天线结构, 并将其与十字分形缝隙阵列结构相结合, 设计了一款三重光子晶体分形缝隙阵列天线, 制

作了天线样品并进行了测试。根据天线样品测试结果,该款天线能够覆盖第二代、第三代、第四代、第五代移动通信系统所有工作频段和RFID系统三个工作频段,在各个工作频带都具有较大的工作带宽和较强的辐射能力。该款天线在所有工作频段都具有高稳定辐射特性,有望用于兼具RFID读写器功能的手机中。

关键词

三重光子晶体天线,分形缝隙结构,十字分形缝隙阵列结构,移动通信系统,射频识别系统

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着移动通信技术的不断发展,不同标准、不同频率、不同制式的多种无线通信频段模式将长期共存。天线是实现射频电流和电磁波能量转换的重要换能器,是移动通信设备传输电磁波信号的重要部件。移动通信的多网络并存要求天线系统能够同时工作在多个频段。我国目前使用的 2G 移动通信频段为 905~915 MHz、950~960 MHz、1710~1785 MHz、1805~1880 MHz 频段;3G 移动通信频段为 1880~1920 MHz、1920~1980 MHz、2010~2025 MHz、2110~2170 MHz、2300~2400 MHz 频段;4G 移动通信频段为 2570~2620 MHz 频段;5G 移动通信频段为 3300~3400 MHz、4400~4500 MHz、4800~4990 MHz 频段[1] [2] [3]。

RFID 技术是一种基于射频无线传输的中远距离自动识别技术,它于上个世纪末被提出并得到广泛应用,近年来已经获得了一系列的成果,在仓储物流、全自动销售、交通运输控制管理、防伪、图书、航空等领域均有广泛的应用。天线在 RFID 系统中具有举足轻重的地位,天线的各项特性及形态大小,极大地影响了 RFID 系统的工作性能及应用领域。RFID 系统有三个主要的工作频段:902~928 MHz、2400~2483.5 MHz、5725~5875 MHz [4] [5] [6]。

移动通信系统和 RFID 系统工作频率接近,且都需要移动终端(手机和 RFID 读写器),如果能设计一款天线,同时覆盖目前应用最广泛的 2G、3G、4G、5G 移动通信系统工作频段和 RFID 系统三个工作频段,就能够实现移动通信系统和 RFID 系统的兼容,让使用这种天线的手机同时具备 RFID 读写器的功能。

本文将采用三重光子晶体天线结构和十字分形缝隙阵列结构相结合的设计思路,设计一款兼具二者优势的三重光子晶体分形缝隙阵列天线,实现对 2G、3G、4G、5G 移动通信系统工作频段和 RFID 系统三个工作频段的完全覆盖。

2. 国内外研究现状

国内外现有的移动通信天线已能够稳定地实现单频段或双频段工作,部分性能较好的移动通信天线已经能够同时工作于三个频段。但是当工作频段多于三个时,国内外现有的移动通信天线在多频段工作方面存在着不足,它们无法在每个工作频段都保持较强的辐射强度和较大的工作带宽,无法保证移动通信无线信号在每个工作频段都有较好的传输效果。2G、3G、4G、5G 移动通信系统总共有超过十个工作频段,要完全覆盖这些工作频段,对国内外现有的移动通信天线是“不可能完成的任务”。目前只有少部分移动通信天线能够同时覆盖 2G、3G 移动通信频段或同时覆盖 2G、4G 移动通信频段。要实现同时覆盖 2G、3G、4G、5G 移动通信频段,现有的移动通信天线技术需要使用多个天线或多组天线阵列,天线占用的空间较大[7] [8] [9]。

国内外现有的 RFID 天线无法同时实现小尺寸、小体积、低回波损耗、大工作带宽和全向辐射这五个要求[10] [11] [12]。目前大部分 RFID 天线使用的是各种印刷偶极子天线或其改进结构, 在小型化和低成本方面做得较好, 但是天线的辐射结构由各式导电墨水印制而成, 天线辐射强度不足, 兼容性较弱, 只能用于无源且对读写距离要求较低的 RFID 标签中。而部分辐射能力较强、读写距离较远的 RFID 读写器天线则存在尺寸较大的问题, 无法放进移动通信手机里, 无法与移动通信系统进行整合。国内外现有的 RFID 天线还不能实现用单一天线同时覆盖 RFID 系统的三个工作频段, 部分已经实现的双频 RFID 天线在两个工作频段的工作性能不平衡。

国内外目前尚未实现移动通信系统和 RFID 系统的整合, 已投入商业运营的手机尚不具备 RFID 读写器的功能, 能够同时覆盖 2G、3G、4G、5G 移动通信频段和 RFID 系统三个工作频段的多频段天线未见报道。

3. 三重光子晶体天线结构简介

图 1 是三重光子晶体天线的结构示意图。光子晶体结构是由多种不同参数的介质周期性分布组成。光子晶体结构最典型的性能特点就是会产生光子带隙, 全部或部分阻碍某个频段电磁波的传播[13] [14] [15] [16] [17]。光子晶体结构在微带天线设计中得到了广泛的应用, 可以有效地改善微带天线的带宽性能。光子晶体结构可与天线的辐射贴片共形, 利用其产生的光子带隙降低天线在原有工作中心频率的辐射, 而将辐射“挤压”到邻近频段, 从而扩大天线的工作带宽[18] [19] [20] [21] [22]。

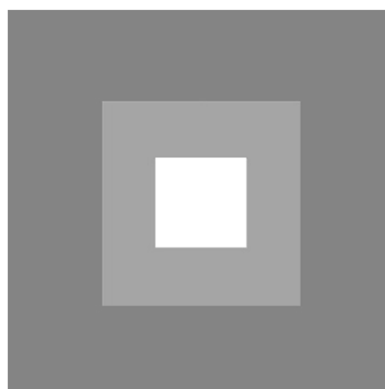


Figure 1. The structure sketch map of the triple photonic crystal antenna
图 1. 三重光子晶体天线结构示意图

三重光子晶体结构包括三层材料, 从外到内分别为纳米银导电墨水、石墨烯导电墨水、钽铌酸钾薄片; 纳米银导电墨水是金属导电墨水, 电导率最高; 石墨烯导电墨水属于碳基导电墨水, 不含金属, 电导率低于金属导电墨水; 钽铌酸钾是一种稳定性很好的高介电常数低损耗化合物, 是一种绝缘体。从外到内, 各层材料的电导率逐渐下降, 整个三重光子晶体结构可以看作是石墨烯导电墨水、钽铌酸钾薄片周期性的分布在纳米银导电墨水中, 而钽铌酸钾薄片周期性的分布在石墨烯导电墨水中。每两层电导率不同的材料形成的光子晶体结构都会产生一个光子带隙, 多个光子带隙叠加, 会形成一个频段较宽的光子带隙。

4. 十字分形缝隙阵列结构简介

分形结构是由法国数学家 Mandelbrot 提出的, 通过迭代产生的具有自相似性的几何结构。分形结构用于天线设计时, 可以保证天线结构内部具有均匀分布的射频电流, 提高天线的工作带宽。

分形阵列结构是阵元天线使用非分形天线结构，而阵列排布方式使用分形迭代规律的一种阵列天线。分形阵列结构可以利用分形结构的自相似性解决阵列天线普遍存在的组阵后工作带宽减小的问题。

十字分形缝隙阵列结构的迭代规律如图 2 所示。单个三重光子晶体天线的工作频段较大，但是有限的辐射能量均匀分布在较宽的工作频带上，不可避免的会存在辐射强度不足的缺点。将多个三重光子晶体天线按照十字分形缝隙的迭代规律，排列组成天线阵列，可以通过多个阵元天线的辐射叠加提高天线的辐射强度，并利用十字分形缝隙的自相似性保证阵列天线也具有宽频带工作能力。

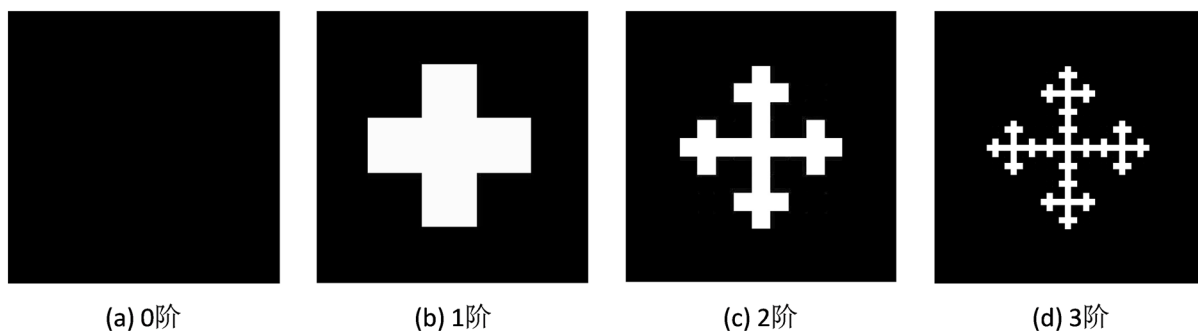


Figure 2. The sketch map of the cross fractal slot array structure

图 2. 十字分形缝隙阵列结构的示意图

5. 天线结构设计

天线基板为低损耗矩形 FR4 基板，介电常数为 5.2，尺寸是 $45\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。天线接地板由纳米银导电墨水印制而成。

图 3 是三重光子晶体分形缝隙阵列辐射贴片结构示意图。天线基板正面是三重光子晶体分形缝隙阵列辐射贴片，背面是全导电接地板。三重光子晶体分形缝隙阵列天线使用十字分形缝隙阵列结构作为基础阵列结构，其包含有 200 个阵元天线区域，每个阵元天线区域的大小为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ，在每个阵元天线区域中心，放置一个三重光子晶体小天线。每个三重光子晶体小天线的底部边沿中心处设有天线馈电点。

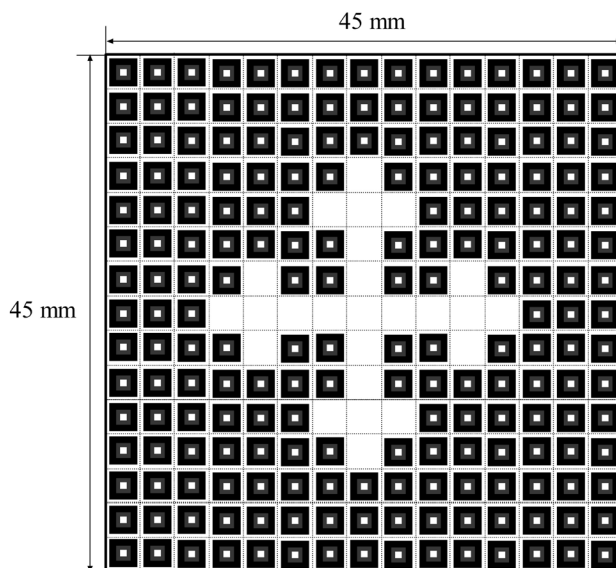


Figure 3. The sketch map of the triple photonic crystal fractal slot array radiation patch

图 3. 三重光子晶体分形缝隙阵列辐射贴片的结构示意图

三重光子晶体小天线的大小为 $2.4\text{ mm} \times 2.4\text{ mm}$ 。三重光子晶体小天线由三层结构组成，外层是一个外边长为 2.4 mm 、内边长为 1.2 mm 的纳米银导电墨水空心正方形环，中间层是一个外边长为 1.2 mm 、内边长为 0.6 mm 的石墨烯导电墨水空心正方形环，内层是一个边长为 0.6 mm 的正方形钽铌酸钾薄片。三重光子晶体小天线包含有钽铌酸钾薄片分布在石墨烯导电墨水中形成的光子晶体，以及石墨烯导电墨水、钽铌酸钾薄片分布在纳米银导电墨水中形成的另一个光子晶体，能够形成多个光子带隙，通过多次展宽效应保证天线具有较宽的工作频段。

设计中使用的十字分形缝隙阵列结构是 2 阶十字分形缝隙阵列结构，它是将一个矩形区域划分为 15 行 15 列共 225 个方形区域，按照图 2 所示挖去 25 个方形区域，形成 2 阶十字分形缝隙，而在剩余的 200 个方形区域放置阵元天线。200 个阵元天线的辐射叠加，会有效增强天线的辐射强度，具有自相似性的分形阵列排布方式保证了阵列天线具有很好的宽频带工作能力。

6. 天线样品制作测试

使用丝网印刷法和 MEMS 工艺，我们完成了天线样品制作。图 4 是天线回波损耗的实测结果，回波损耗是天线反射系数的负对数，回波损耗越小表示天线的匹配越好、辐射能力越强。图 5 是天线方向图的实测结果。

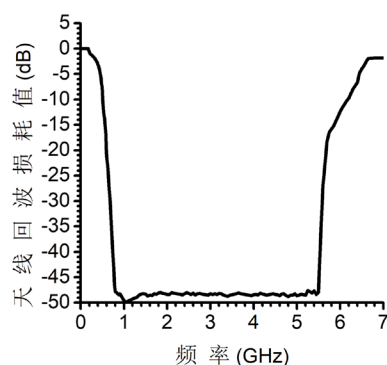


Figure 4. The measured radiation characteristics of antenna

图 4. 天线实测辐射特性

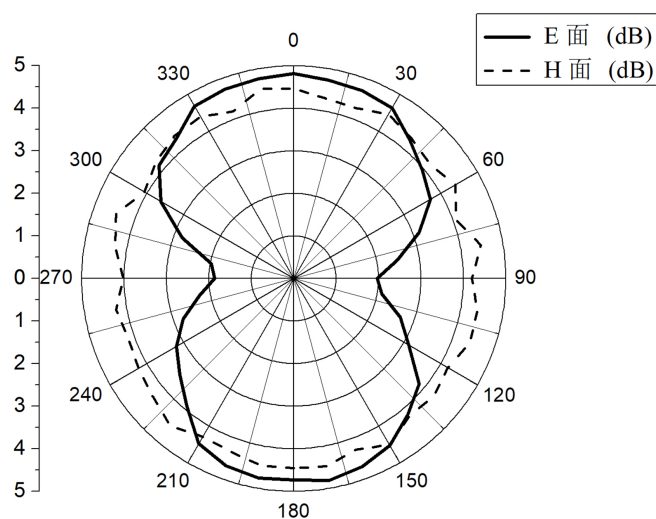


Figure 5. The measured radiation pattern of antenna

图 5. 天线实测方向图

图4显示,天线的工作频段范围为511~6178 MHz,工作带宽为5667 MHz,带宽倍频程为12.09,回波损耗最小值为-49.89 dB。该款天线能够同时工作在2G、3G、4G、5G移动通信系统所有工作频段和RFID系统三个工作频段,且在所有的工作频段都具有稳定而均匀的辐射性能,回波损耗值在每个工作频段内的波动都很小。

图5显示,天线的电面和磁面覆盖的角度都达到了360度,都能够全向辐射。

该款天线是一款性能优异的多频段兼容天线,该款天线拥有200个对称排列的阵元天线,结构冗余较大,即使遇到外力冲击,部分天线结构遭到破坏,天线仍然能够辐射工作;该款天线性能冗余较大,回波损耗优于移动通信天线和RFID天线回波损耗最小值低于-20 dB的常规要求,能够保证在多个工作频段都有较好的传输效果;该款天线宽频带工作能力突出,工作带宽超过5600 MHz,带宽倍频程大于12,多频段兼容能力远超现有的移动通信天线和RFID天线。

7. 结束语

本文针对多频段兼容移动通信系统和RFID系统对天线的性能要求,设计了新型的三重光子晶体天线,将其与十字分形缝隙阵列结构相结合,设计了三重光子晶体分形缝隙阵列天线。在阵列天线设计方案中,使用纳米银导电墨水、石墨烯导电墨水、钽铌酸钾薄片层层嵌套,组成能产生频段较宽的光子带隙的三重光子晶体结构,将三重光子晶体天线作为阵元天线,利用光子晶体结构的宽频段辐射工作能力,保证阵元天线拥有较大的工作带宽。多个三重光子晶体天线按照十字分形缝隙阵列结构排列组成天线阵列,在利用辐射叠加原理提高天线的辐射强度的同时,保证了阵列天线具有和阵元天线相似的宽频带工作性能。实测结果显示,该款天线成功实现了2G、3G、4G、5G移动通信系统和RFID系统的兼容,在新一代移动通信领域有望得到广泛应用。未来如果进一步改进光子晶体结构设计,将三重光子晶体结构改进为四重、五重光子晶体结构,有望进一步提高天线宽频带工作能力。

基金项目

福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(闽教科[2017]52号)。

参考文献

- [1] Yin, J., Wu, Q., Yu, C., Wang, H. and Hong, W. (2019) Broadband Endfire Magnetolectric Dipole Antenna Array Using SICL Feeding Network for 5G Millimeter-Wave Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 4895-4900. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2916463>
- [2] Zhang, Y., Deng, J.Y., Li, M.J., Sun, D. and Guo, L. (2019) A MIMO Dielectric Resonator Antenna with Improved Isolation for 5G mm-Wave Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **18**, 747-751. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2901961>
- [3] Aliakbari, H., Abdipour, A., Costanzo, A., et al. (2019) Far-Field-Based Nonlinear Optimization of Millimeter-Wave Active Antenna for 5G Services. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **67**, 2985-2997. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2909898>
- [4] Salah, H., Robert, J., Ahmed, H.A., Mahmoud, K. and Heuberger, A. (2019) Theoretical Performance Evaluation of UHF-RFID Systems with Multi-Antenna Maximum-Likelihood Decoding. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, **3**, 108-117. <https://doi.org/10.1109/JRFID.2019.2909504>
- [5] Deng, W., Li, Z., Xia, Y.L., Wang, K. and Pei, W. (2019) A Widely Linear MMSE Anti-Collision Method for Multi-Antenna RFID Readers. *IEEE Communications Letters*, **23**, 644-647. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2902545>
- [6] Yan, Y., Ouyang, J., Ma, X., Wang, R. and Sharif, A. (2019) Circularly Polarized RFID Tag Antenna Design for Metallic Poles Using Characteristic Mode Analysis. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **18**, 1327-1331. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2915369>
- [7] Lee, W., Hong, Y.K., Won, H.Y., et al. (2019) Dual-Band (5G Millimeter-Wave and Dedicated Short-Range Commu-

- nication) Stacked Patch Antenna for Advanced Telematics Applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, **61**, 1381-1387. <https://doi.org/10.1002/mop.31737>
- [8] Li, Y.P., Zhao, Z.P., Tang, Z.Y. and Yin, Y. (2019) A Low-Profile, Dual-Band Filtering Antenna with High Selectivity for 5G Sub-6 GHz Applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, **61**, 2282-2287. <https://doi.org/10.1002/mop.31891>
- [9] Hussain, R., Alreshaid, A.T., Podilchak, S.K., *et al.* (2017) A Compact 4G MIMO Antenna Integrated with a 5G Array for Current and Future Mobile Handsets. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, **11**, 271-279. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0738>
- [10] Gu, X.Z. and Wen, G.Y. (2019) Design of a Near-Field RFID Antenna Array in Metal Cabinet Environment. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **18**, 79-83. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2880965>
- [11] Amendola, S., Palombi, A. and Marrocco, G. (2018) Inkjet Printing of Epidermal RFID Antennas by Self-Sintering Conductive Ink. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **66**, 1561-1569. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2767594>
- [12] Marouf, F.Z. and Kerarti, D.Z. (2018) Study and Design of Wristband RFID Antenna for Healthcare Applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, **60**, 359-364. <https://doi.org/10.1002/mop.30973>
- [13] Zhang, Y., Wang, B.C., Nie, A.M., *et al.* (2019) Carbonaceous Photonic Crystals Prepared by High-Temperature/Hydrothermal Carbonization as High-Performance Microwave Absorbers. *Journal of Materials Science*, **54**, 14343-14353. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03909-7>
- [14] Yang, H.W., Wang, Y.Q. and Peng, S. (2019) Analysis of the Propagation Properties of Photonic Crystals with Defect by the Precise Integration Time Domain Method. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **33**, 2112-2125. <https://doi.org/10.1080/09205071.2019.1663275>
- [15] Abd, E.O.A., Elsayed, H.A. and Sayed, M.I. (2019) One-Dimensional Defective Photonic Crystals for the Sensing and Detection of Protein. *Applied Optics*, **58**, 8309-8315. <https://doi.org/10.1364/AO.58.008309>
- [16] Okayama, H., Onawa, Y., Takahashi, H., *et al.* (2019) Reflective Arrayed Waveguide Grating with Parallel Arms Using One-Dimensional Photonic Crystal Reflector. *Electronics Letters*, **55**, 1143-1145. <https://doi.org/10.1049/el.2019.2030>
- [17] Zhang, X., Zhu, X.S. and Shi, Y.W. (2018) Improving the Performance of Hollow Fiber Surface Plasmon Resonance Sensor with One Dimensional Photonic Crystal Structure. *Optics Express*, **26**, 130-140. <https://doi.org/10.1364/OE.26.000130>
- [18] Zhu, X.M., Liu, B.S. and Wang, X.G. (2019) Design of Compact MEMS Antenna Based on Photonic Crystal Structure. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, **14**, 2085-2090. <https://doi.org/10.1007/s42835-019-00233-7>
- [19] Ehsan, R. and Mehdi, A.B. (2018) Improving the Efficiency and Directivity of THz Photoconductive Antennas by Using a Defective Photonic Crystal Substrate. *Optics Communications*, **412**, 74-79. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.12.011>
- [20] Heba, Z., Moataza, H. and Adel, E.H. (2017) Optically Controlled UWB Antenna Using Photonic Crystal Waveguides. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, **9**, 1661-1666. <https://doi.org/10.1017/S1759078717000241>
- [21] Withayachumnankul, W., Yamada, R., Fumeaux, C., Fujita, M. and Nagatsuma, T. (2017) All-Dielectric Integration of Dielectric Resonator Antenna and Photonic Crystal Waveguide. *Optics Express*, **25**, 14706-14714. <https://doi.org/10.1364/OE.25.014706>
- [22] Zhu, X.M., Yang, X.D. and Wang, X.G. (2017) Compact Extremely Wideband Antenna with Photonic Crystal Structure Based on MEMS Manufacturing Technology. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, **67**, 103-109. <https://doi.org/10.2528/PIERL17011906>