

Analysis on Tunable Circularly Polarized Antenna for Applications of UHF RFID Reader Devices

Kaimin Wu¹, Xuefeng Zhao^{1,2}, Yongjun Huang¹, Haibin Sun¹, Guangjun Wen¹

¹Centre for RFIC and System Technology, School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan

²School of Computer Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang Jiangsu

Email: yongjunh@uestc.edu.cn

Received: Feb. 26th, 2015; accepted: Mar. 10th, 2015; published: Mar. 12th, 2015

Copyright © 2015 by authors 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

Abstract

A tunable circularly polarized (CP) patch antenna based on ferrite substrate is discussed in this paper, for universal ultra-high-frequency (UHF) RF identification (RFID) applications. Such antenna is composed of top dielectric layer printed with rectangular radiation patch, middle ferrite layer, and bottom dielectric layer printed with ground plane. The ferrite layer under an applied dc magnetic bias provides the CP radiation characteristic. Most importantly, ferrite layer can tune arbitrarily the operating frequency band in a wide range covering all the worldwide operating frequency bands of UHF RFID, by adjusting the dc magnetic bias. Theoretical analysis on the reason to realize CP properties without perturbation for the radiation patch and the tunability of operating frequency are firstly presented. Numerical results demonstrate that the proposed antenna, can be arbitrarily operated from 840 to 960 MHz with a narrow impedance bandwidth of about 7 MHz, a tunable gain level ranged from -1.9 to 2.5 dBic, and a wide 3-dB AR beamwidth of 120° over the impedance bandwidth.

Keywords

Circularly Polarized Antenna, UHF RFID, Ferrite, Tunable

一种UHF RFID阅读器终端可调谐圆极化天线研究

吴凯敏¹, 赵雪峰^{1,2}, 黄勇军¹, 孙海斌¹, 文光俊¹

¹电子科技大学通信与信息工程学院射频集成电路与系统研究中心, 四川 成都

²淮海工学院计算机工程学院, 江苏 连云港

Email: yongjunh@uestc.edu.cn

收稿日期: 2015年2月26日; 录用日期: 2015年3月10日; 发布日期: 2015年3月12日

摘 要

本文理论和仿真研究一种基于铁氧体基板的应用于超高频(UHF)射频识别(RFID)阅读器终端的可调谐型圆极化天线。这种天线由上层印制有辐射贴片的介质板、中间铁氧体层以及下层印制有接地面的介质板构成。其中铁氧体层在外加磁场作用下能使常规微带天线提供圆极化的辐射特性。更重要的是, 这种天线的圆极化工作频率可随外加磁场强度的变化而产生频移特性, 从而可覆盖世界范围内的所有UHF RFID工作频率。本文首先理论分析这种天线实现圆极化以及频率可调谐的原理, 然后通过仿真研究实现一种可工作在840 MHz至960 MHz频率范围内的微带天线, 3-dB阻抗带宽为7 MHz。同时, 这种天线的增益在-1.9 dBic至2.5 dBic范围内可调, 且在阻抗带宽内具有能覆盖120°的3-dB轴比特性。

关键词

圆极化天线, UHF RFID, 铁氧体, 可调谐

1. 引言

射频识别(RFID)技术是从第二次世界大战开始发展起来的, 其主要是采用射频电磁波读取粘贴在目标体上的标签以识别和跟踪目标体。近年来 RFID 技术已广泛应用于物流链管理、电子支付以及贵重货物的溯源等领域。特别是近几年发展较快的物联网技术: 一种通过无线网络唯一识别目标体的贯穿于人们生活方方面面的新型网络技术[1]。在 RFID 发展过程中, 工作在超高频(UHF)频率的无源 RFID 系统由于在阅读距离和快速阅读量之间存在良好的平衡关系而受到广泛关注和研究。但是, 世界范围内针对 UHF RFID 阅读器技术的频率标准却不尽相同[2]。表 1 所示为世界范围内主要的 UHF RFID 工作频率标准, 由此表可知, 不同国家和地区之间存在较大的差别。其总的频率范围为 840 MHz~960 MHz, 但是针对每个国家的标准, 其工作带宽一般小于 5 MHz (美洲除外)。因此, 针对不同国家和地区的应用标准, 一般需要设计工作在不同频段的各种阅读器天线。此外, 微带天线由于具有质量轻、易共形、加工成本低等优点而广泛应用于 UHF RFID 阅读器天线的设计, 但是常规微带天线的工作带宽较窄, 不能有效地覆盖世界范围内的工作频段。因此, 设计实现一种可覆盖世界范围内的 UHF RFID 标准的微带天线具有重要研究意义。

另一方面, 由于粘贴在目标体上的标签天线为线极化天线, 且安装位置和方向任意, 因此需要阅读器天线具有圆极化特性, 才能保证正常的通信和跟踪溯源。基于上述限制, 研究者提出了几种可覆盖世

Table 1. The worldwide operating frequency ranges for the UHF RFID
表 1. 世界范围内 UHF RFID 工作频率范围

国家/地区	工作频率范围
美洲	902 MHz~928 MHz
欧洲	865 MHz~867 MHz
中国大陆	840.5 MHz~844.5 MHz
中国香港	865 MHz~868 MHz, 920 MHz~925 MHz
台湾	920 MHz~928 MHz
日本	952 MHz~955 MHz
印度	865MHz~867 MHz
韩国	908.5 MHz~910 MHz, 910 MHz~914 MHz
新加坡	866 MHz~869 MHz
澳大利亚	920 MHz~926 MHz

界范围内的微带圆极化天线设计方法[3]-[5],其具体实现途径是采用层叠的圆极化微带天线以及以空气作为介质基底以增加其工作带宽。这类实现方法的缺点是空间尺寸大、馈电网络复杂等。

铁氧体材料作为一种有源可控制介质基底,已广泛应用于设计微波圆极化天线[6]-[9],带阻滤波器[10],以及近年来提出的人工介质材料[11][12]。铁氧体材料在外加直流偏置磁场作用下其磁导率为各向异性,且能通过调节外加偏置场强度控制磁导率特性。因此,可以将铁氧体材料作为 UHF RFID 阅读器天线的介质基底,实现频率可调谐的天线设计。同时,基于铁氧体的微带天线在没有微扰或者复杂相移馈电网络的情况下即可自然的圆极化辐射特性,其左旋/右旋极化状态可通过偏置场的方向改变[6]。因此,基于铁氧体的圆极化微带天线具有结构简单,频率控调谐等独特优点。本文将首先简要分析铁氧体在外加偏置场作用下的磁导率张量形式,以及其实现圆极化辐射的基本原理;然后设计出能覆盖世界范围内 UHF RFID 标准的小型化圆极化微带天线结构,并分析其阻抗带宽、辐射性能和频率可调谐特性等。

2. 理论分析

2.1. 铁氧体在外加偏置作用下的磁导率模型

铁氧体材料作为磁性材料大家族中的一种,在外加直流偏置场作用下,其中磁偶极子遵循同一排列方向,从而能产生非零的合成磁偶极矩,并使磁偶极子在由偏置磁场强度所控制的频率下做进动,其等效磁导率将显示出各向异性特性。根据铁氧体材料理论分析可知[13],当外加直流磁场沿 z 方向作用于亚铁磁性材料时,其磁导率张量可表示为

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu & j\kappa & 0 \\ -j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \quad (2)$$

$$\kappa = \mu_0 \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (3)$$

其中 $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$ 为铁氧体材料的拉模频率(亚铁磁共振频率, Ferrimagnetic Resonance-FMR), $\omega_m = \mu_0 \gamma M_s$ 为铁氧体材料的特征频率, $\gamma = 1.759 \times 10^{11}$ 为旋磁比, ω 为角频率, μ_0 为自由空间磁导率, M_s 为饱和磁化强度。 H_0 为内部直流偏置磁场强度, 其与外加偏置场 H_e 的关系为 $H_0 = H_e - M_s$ 。由此可知, 当改变外加偏置场强时, 其等效磁导率特性将产生变化, 对于嵌有铁氧体介质基底的微带天线, 其表现为谐振频率将产生频移现象。

2.2. 基于铁氧体的微带天线圆极化辐射实现机理

本文采用典型的腔体模型来分析嵌有铁氧体材料的微带天线的工作模式, 同时使用圆形辐射贴片作为例子(方形贴片具有类似的性质)。假设圆形辐射贴片的半径为 a , 外加偏置场垂直作用于该圆形辐射贴片微带天线, 其 TM 模式的波方程为(在球面坐标系下) [6] [14]

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + k^2 E_z = 0 \quad (4)$$

其中

$$k^2 = \omega^2 \mu_{\text{eff}} \varepsilon, \quad (5)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu} \quad (6)$$

因此方位角磁场分量为

$$H_\phi = \frac{-jY}{\kappa\mu} \left(\frac{-j\kappa}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} + \mu \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right) \quad (7)$$

其中波导纳 Y 定义为

$$Y = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu_{\text{eff}}}} \quad (8)$$

因此, 求解式(4)可得

$$E_z = [A^+ e^{jn\phi} + A^- e^{-jn\phi}] J_n(k\rho) \quad (9)$$

上式为以方位角 ϕ 为传播模式的解, 其中 $n = +1$ 代表左旋圆极化模式, $n = -1$ 代表右旋圆极化模式。考虑到 TM_{11} 模式在 $\rho = a$ 的磁场边界条件(理想磁壁), 有如下关系式

$$H_\phi(\rho = a) = -jYA^+ e^{j\phi} \left[J_1'(ka) + \frac{\kappa}{ka\mu} J_1(ka) \right] - jYA^- e^{-j\phi} \left[J_1'(ka) - \frac{\kappa}{ka\mu} J_1(ka) \right] \quad (10)$$

因此, 其共振频率可从下式中获得

$$J_1'(ka) \pm \frac{\kappa}{ka\mu} J_1(ka) = 0 \quad (11)$$

其中符号+和-分别代表左旋圆极化和右旋圆极化模式。当偏置磁场作用于铁氧体上, 由式(11)可以得出两个不同的谐振频率; 同时, 当磁场方向反向时, κ 的符号发生变化, 因此最终的左旋和右旋辐射模式对调。

值得注意的是, 当微带天线的谐振频率落在铁氧体的非寻常波传播模式中时, 将不会出现谐振现象, 微带天线将无法工作。其对应的频率范围为

$$\sqrt{\omega_0(\omega_0 + \omega_m)} < \omega < \omega_0 + \omega_m \quad (12)$$

此时的等效磁导率 $\mu_{\text{eff}} < 0$ [11] [12]。因此,在设计基于铁氧体的圆极化微带天线时,需要综合考虑贴片的尺寸以及铁氧体参数的选择。下一节将通过基于有限元法的全波电磁仿真软件来优化设计基于铁氧体的 UHF RFID 微带天线。

3. 结构设计和数值仿真

基于铁氧体材料的 UHF RFID 阅读器天线结构示意图如图 1 所示。该天线由三层功能层层叠构成,其中上层为刻蚀有辐射贴片的介质层;中间层为铁氧体材料层(TTI-414 系列,饱和磁化强度 $4\pi M_s = 750 \text{ Gs}$,铁磁谐振线宽 $\Delta H = 144 \text{ Oe}$,相对介电常数 $\epsilon_r = 11.3$,损耗角正切 $\tan\delta = 0.00025$);下层为刻蚀有接地平面的介质层。其中两层介质为罗杰斯 RO4003 板材(相对介电常数 $\epsilon_r = 3.55$,损耗角正切 $\tan\delta = 0.0027$),用于减小铁氧体材料与金属层的相互影响[11] [12]。该天线采用单馈点方法以简化馈电网络。由上一节理论分析可知,当一外加直流磁场沿 z 轴方向作用于铁氧体材料时,其磁导率张量表现出磁各向异性特性,因此由其构成的微带天线可产生圆极化特性。如图 1 所示,由于铁氧体材料的高介电常数特性以及紧凑的构造方法,该天线尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 2.6 \text{ mm}$,远小于先前已报道的各种通用 UHF RFID 阅读器天线尺寸(大约 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 36.6 \text{ mm}$ [4] [5])。本文采用基于有限元法的 HFSS 仿真软件,数值仿真研究该天线在不同外加直流磁场强度下的工作频带频移特性以及辐射特性。

4. 结果讨论

图 2 所示为仿真得出的该天线在外加直流磁场为 450 Oe 时的电压驻波比(VSWR)、轴比(AR)、天顶方向增益、 x - z 面以及 y - z 面辐射方向图。由图 2(a)可知,该天线在 450 Oe 的外加磁场强度下,工作于 910 MHz ,阻抗带宽(VSWR < 1.5)为 7 MHz ,增益为 1.2 dBic ,3-dB 轴比带宽 53 MHz 。上述指标显示该天线与普通微带天线相似,但从轴比特性以及左旋(LHCP)和右旋(RHCP)辐射方向图特性可知,该天线在没有对辐射贴片切角等微扰以及采用复杂相移馈电网络的情况下实现了圆极化特性,因此明显优于常规圆极化微带天线构造方法。

如图 2(b)所示,该天线的辐射方向图在 x - z 平面和 y - z 平面同时具有高度对称特性,以及非常宽的轴

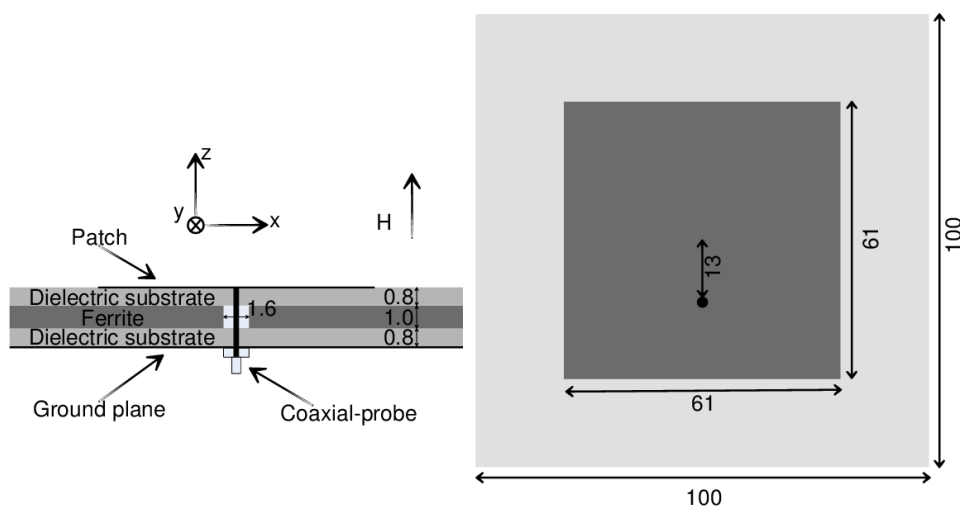


Figure 1. The configuration of proposed tunable ferrite-based universal UHF RFID reader antenna. The unit used in this figure is mm

图 1. 基于亚铁磁性材料的通用 UHF RFID 阅读器天线结构示意图, 图中尺寸单位为毫米

比辐射角度(3-dB 轴比辐射角度大于 146°)，足以用于宽扫描覆盖的 RFID 应用需求。另外，该天线在 910 MHz 的半功率宽度为 105° ， x - z 平面和 y - z 平面的前后比为 9 dB。其天线增益以及前后比小于先前已报道的通用 UHF RFID 阅读器天线[4] [5]，但可适当增加地平面尺寸来增加其增益以及前后比特性。

前面已讨论了基于铁氧体材料的圆极化微带天线基本特性以及一些独特的性质，下面将继续另一独特性质，即其随外加直流磁场强度变化的可调谐特性。图 3 所示为该天线在不同外加直流磁场强度下(330~700 Oe)的电压驻波比(VSWR)特性。由图 3 可知，该天线的谐振频率从 838 MHz 平移到 960 MHz，覆盖了整个 UHF RFID 的工作频段。当外加直流磁场强度逐渐减小时，其驻波比特性变差；当直流磁场强度逐渐增加时，另一个谐振频率点出现在 UHF 频段。此特性主要因为基于铁氧体材料的微带天线在两个不同的频点具有左旋或右旋圆极化特性[6]，该特性可用于设计基于铁氧体材料的卫星通信或导航定位天线等应用领域。

该天线在不同外加直流磁场强度下的其他电参数特性如表 2 所示。由此表可知，随着外加磁场强度的增加，该天线的阻抗带宽没有明显变化(除了在 330 Oe 条件下的阻抗不匹配)，3-dB 轴比带宽先增加到 53 MHz 后减小到 31 MHz，在 x - z 平面和 y - z 平面的增益以及 3-dB 轴比波瓣宽度逐渐增加，在 x - z 平面和

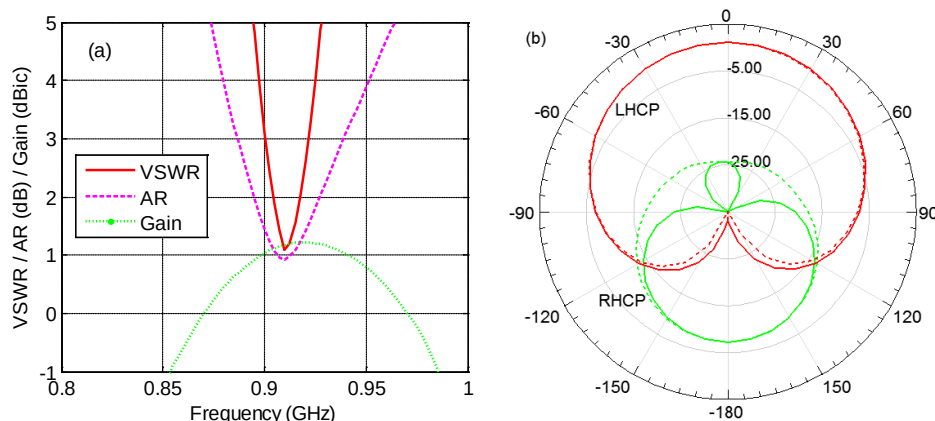


Figure 2. Simulated results of the proposed antenna. (a) VSWR, AR, and gain; (b) LHCP and RHCP radiation patterns in the x - z plane and y - z plane at frequency of 910 MHz

图 2. 仿真得出的天线特性。(a) 电压驻波比(VSWR)、轴比(AR)、增益；(b) 在 x - z 平面和 y - z 平面的左旋(LHCP)和右旋(RHCP)圆极化辐射特性

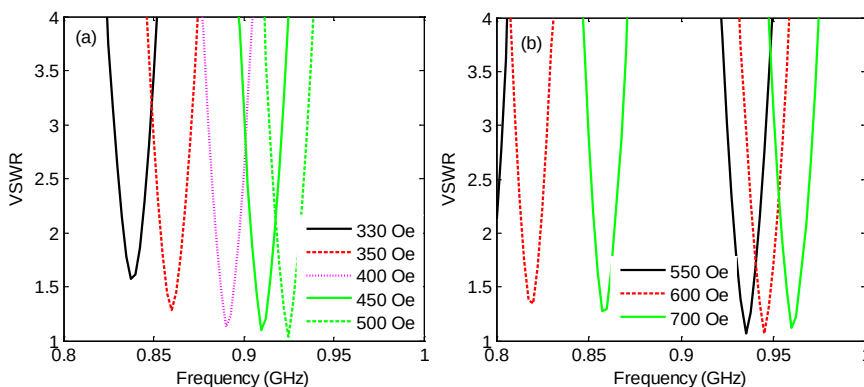


Figure 3. Simulated VSWR of the proposed antenna under different magnetic biases ranged from (a) 330 to 500 Oe and (b) 550 to 700 Oe

图 3. 该天线在不同外加直流磁场强度下驻波比特性 (a) 330~500 Oe; (b) 550~700 Oe

Table 2. The electrical characteristics of the proposed ferrite-based antenna under different dc magnetic biases
表 2. 该天线在不同外加直流磁场强度下的各电参数特性

偏置场强度(Oe)	谐振频率 (MHz)	阻抗带宽 (VSWR < 1.5)(MHz)	3-dB 轴比带宽 (MHz)	增益(dBic)	3-dB 轴比波束宽度 x-z/y-z 面(°)	半波功率波束宽度 x-z/y-z 面(°)
330	838	None	40	-1.9	174/120	108/108
350	860	6	46	-1	171/131	106/106
400	890	7	53	0.5	175/142	108/108
450	910	7	53	1.2	177/146	105/105
500	925	7	49	1.6	183/147	107/107
550	935	7	44	1.9	184/147	105/105
600	945	7	39	2.2	187/147	106/106
700	960	7	31	2.5	190/145	104/104

y - z 平面的半波功率宽度逐渐减小。另外, 在任意外加磁场强度下, 其在 x - z 平面和 y - z 平面的半波功率宽度是相等的, 因此其辐射方向图具有高度的对称性。

因此, 本文所设计的基于亚铁磁性材料的圆极化微带天线在不同外加磁场强度下均表现出很好的圆极化天线辐射性能, 因此, 能很好地应用于全球通用的 UHF RFID 阅读器天线设计。

5. 结论

本文提出了一种 UHF RFID 全频段通用的基于铁氧体材料的圆极化微带天线设计方法, 理论介绍了铁氧体材料的张量磁导率特性以及产生圆极化辐射的激励, 并数值仿真研究了其各种电性能以及可调谐特性。该天线具有不需要微扰以及复杂馈电网络即可实现圆极化特性、随外加磁场强度变化的可调谐特性等特点, 因此该天线明显优于常规圆极化微带天线, 可用于 UHF RFID 阅读器的天线设计应用。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(编号: 61371047)。

参考文献 (References)

- [1] Welbourne, E., Battle, L., Cole, G., Gould, K., Rector, K., Raymer, S., Balazinska, M. and Borriello, G. (2009) Building the internet of things using RFID: The RFID ecosystem experience. *IEEE Internet Computing*, **13**, 48-55.
- [2] Chen, Z.N. and Qing, X. (2010) Asymmetric-circular shaped slotted microstrip antennas for circular polarization and RFID applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **58**, 3821-3828.
- [3] Rao, K.S., Nikitin, P.V. and Lam, S.F. (2005) Antenna design for UHF RFID tags: A review and a practical application. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **53**, 3870-3876.
- [4] Chen, Z.N., Qing, X. and Chung, H.L. (2009) A universal UHF RFID reader antenna. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **57**, 1275-1282.
- [5] Wang, Z., Fang, S., Fu, S. and Jia, S. (2011) Single-fed broadband circularly polarized stacked patch antenna with horizontally meandered strip for universal UHF RFID applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **59**, 1066-1073.
- [6] Pozar, D.M. (1992) Radiation and scattering characteristics of microstrip antennas on normally biased ferrite substrates. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **40**, 1084-1092.
- [7] Mishra, R.K., Pattnaik, S.S. and Das, N. (1993) Tuning of microstrip antenna on ferrite substrate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **41**, 230-233.
- [8] Sigalov, M., Shavit, R., Joffe, R. and Kamenetskii, E.O. (2013) Manipulation of the radiation characteristics of a patch antenna by small ferrite disks inserted in its cavity domain. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61**,

2371-2379.

- [9] Zervos, T., Alexandridis, A.A., Lazarakis, F., Pissas, M., Stamopoulos, D., Angelopoulos, E.S. and Dangakis, K. (2012) Design of a polarisation reconfigurable patch antenna using ferrimagnetic materials. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, **6**, 158-164.
- [10] Hwang, K.C. and Eom, H.J. (2005) Tunable notch filter of ferrite-filled grooves in parallel plates. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, **15**, 363-365.
- [11] Huang, Y., Wen, G., Li, T. and Xie, K. (2010) Positive-negative-positive metamaterial consisting of ferrimagnetic host and wire array. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, **25**, 696-702.
- [12] Huang, Y.J., Wen, G.J., Yang, Y.J. and Xie, K. (2012) Tunable dual-band ferrite-based metamaterials with dual negative refractions. *Applied Physics A*, **106**, 79-86.
- [13] Lax, B. and Button, K.J. (1962) *Microwave ferrites and ferrimagnetics*. McGraw-Hill, New York.
- [14] Pozar, D.M. (2009) *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, New York.