文章编号:1671-4598(2018)09-0292-05　DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2018.09.062　中图分类号:TN82　文献标识码:A

基于超材料的低剖面宽带双极化天线设计

刘松涛，秦顺友，韩国栋
（中国电子科技集团公司 第五十四研究所，石家庄　050081）

摘要： 设计了一种基于超材料的低剖面宽带双极化天线；该天线采用复合左右手结构（CRLH）作为辐射单元，利用其色散曲线的非线性的特点，实现两种模式谐振点的融合，拓展带宽；同时采用不连通的十字形缝隙改善异极化隔离与交叉极化；阐述了以复合左右手结构作为天线辐射单元的宽带低剖面天线的工作原理以及复合左右手结构色散图的绘制方法；论述了宽带低剖面线极化天线、水平/垂直双极化天线、±45°双极化天线的设计方法，并给出了 HFSS 的仿真结果；仿真结果表明：该天线具有小型化、低剖面、宽频带的特点，可用作大型天线阵的阵元。

关键词： CRLH；低剖面；双极化天线；

Design of Metamaterial-Based Low-Profile Broadband Dual-Polarized Antenna

Liu Songtao，Qin Shunyou，Han Guodong
（The 54th Research Institute of CETC，Shijiazhuang　050081，China）

Abstract： A metamaterial-based low-profile broadband dual-polarized antenna is designed. Due to the non-linear characteristic of the dispersion diagram，it is easier for the proposed antenna to merge two adjacent resonance points which uses CRLH structure as radiation unit，leading to the enhancement of the bandwidth. The novel cross-shaped coupling slot has a positive contribution on the improvement of the performance of the isolation and cross polarization. The operating principle of the low profile wideband antennas using CRLH structure as radiation unit and the method to draw the dispersion diagram of the CRLH structure are proposed . The design principle and simulated results of the low-pro broadband antenna，the horizontal/vertical dual-polarized antenna，and the ±45°dual-polarized antenna are proposed. The simulated results show that low-profile and wideband characteristic of the antennas which can be used as the units of the phased array antennas.

Keywords： CRLH；low-profile；dual-polarized antenna

0　引言

随着电子器件和电路系统向着小型化、集成化、多功能的方向发展，留给天线的空间越来越小，这就要求在设计天线时要尽可能降低天线的剖面高度与尺寸，在保证优良性能的前提下尽可能的减小天线尺寸是目前研究的重点。超材料作为一种新型的电磁材料，通过设计材料的关键物理结构，可以使该材料呈现出与自然界普通材料不一样的奇异特性，为实现天线的小型化、宽频带、低剖面、高增益提供了新思路[1-2]。

电磁带隙结构（EBG）具有同相反射性，以 EBG 结构作为天线反射板，是常见的降低天线剖面的方法[3-5]，但 EBG 结构具有窄带特性，用此种方法很难实现宽带天线。文献［6］使用蘑菇型 CRLH 结构实现低剖面，但该天线尺寸过大，为 1.1λ（1.1λ(λ 为真空中该天线中心频点对应波长)，且波束宽度较窄，不利于组阵应用，此外，蘑菇型结构存在过孔，加工较为复杂。文献［7］中的天线无过孔结构，但天线尺寸过大，不能组阵，并且该天线为单线极化，不能满足移动通信的需求。

本文通过推导单负型 CRLH 结构谐振频率的公式，得出影响其谐振频率的参数，通过合理选择 CRLH 单元尺寸、单元间隙、介电常数等参数，降低其谐振频率，实现低剖面与小型化兼顾。并在此基础上设计了两种低剖面双极化天线，都具有良好的带宽与驻波特性，并且易于组阵，可应用于移动通信中。

1　低剖面天线设计原理

复合左右手传输线即传统右手传输线中引入左手电容、左手电感，从而获得特殊的电磁特性。其中复合左右手材料可分为双负型结构与单负型结构。双负型结构即同时引入左手电容、左手电感，使得等效磁导率、等效介电常数都为负数，该结构传播常数可为负数、正数或者为 0，利用该特性，该结构常被用来设计零阶谐振天线，实现天线的小型化。单负型结构即仅引入左手电容或左手电感，其等效磁导率、等效介电常数仅有一个为负值。不论双负型结构和单负型结构，其色散图都是非线性的，以之作为辐射单元设计的天线，谐振频率是不调和的，即 $W_m \neq mW_1$，其

收稿日期：2018-07-04；　**修回日期：**2018-08-06。
基金项目：河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(16960404D)。
作者简介：刘松涛(1993-)，男，河北石家庄人，在读研究生，主要从事电磁超材料及相控阵天线方向的研究。

中 m 为谐振阶数，W_1 为一阶谐振频率。利用复合左右手结构的该特性，使得一阶、二阶谐振频率更容易融合，实现宽频特性。

当 CRLH 结构单元边长小于 $1/4\lambda$ 时，可认为是均匀型结构，当单元高度 h 远小于波导波长时，可利用传输线模型分析。以 CRLH 结构作为辐射单元设计微带天线，根据微带天线传输线模型，将周期性 CRLH 结构贴片看作边长为 L 的一段微带传输线，沿着 x 方向的终端呈现开路，故形成电压波腹，若贴片 x 方向长度为 $\lambda_m/2$（λ_m 为微带线上波长），则 L 另一端也是电压波腹，天线的辐射主要由贴片与地板间的缝隙形成。于是该复合左右手结构可表示为相距 L 的两条具有等效复导纳的缝隙，复导纳的等效长度为 ΔL。等效长度及该区域内等效介电常数、等效传播常数经验公式如下[6]：

$$\frac{\Delta L}{h}=0.412\frac{(\varepsilon_{reff}+0.3)(\frac{L}{h}+0.262)}{(\varepsilon_{reff}-0.258)(\frac{L}{h}+0.813)} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{reff}=\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2}(1+12\frac{h}{L})^{-+} \tag{2}$$

$$\beta_{reff}=k_0\sqrt{\varepsilon_{reff}}=\frac{2\pi f}{c}\sqrt{\varepsilon_{reff}} \tag{3}$$

复合左右手结构的传播常数 β_{CLHR} 可由其色散图求得。由微带天线传输线模型可得，需要在缝隙两侧形成电压波腹方可实现辐射，这就需要电磁波沿 x 方向相位变化为 180°。故 TM_{10} 模谐振频率可由下式求得：

$$N(4w+3g)\beta_{CRLH}+2\beta_{reff}\Delta L=\pi \tag{4}$$

由于地板上的电磁耦合缝隙在复合左右手单元间的缝隙正下方，使得缝隙两侧的电场方向相反，则 TM_{20} 谐振频率为：

$$\frac{N(4w+3g)\beta_{CRLH}}{2}+2\beta_{reff}\Delta L=\pi \tag{5}$$

色散曲线可通过布里渊区法直接获得；或者利用波导传输法，从 S 参数中提取。结合上式计算出 TM_{10} 模式和 TM_{20} 模式的谐振频率。

文献［2］中采用加载左手电容的单负型复合左右手结构，其等效磁导率为负值，故又被称为 MNG 传输线。两端开路的 MNG 传输线可看作是一种谐振器结构，由于左手特性，MNG 传输线色散图为非线性的。对周期性 MNG 单元结构应用 Bloch－Floquet 定理，MNG 传输线的相位常数有如下表达式[8-9]：

$$\beta(w)=\frac{1}{p}\cos^{-1}(1-\frac{w^2}{2w_R{}^2}+\frac{w_E{}^2}{2w_R{}^2}) \tag{6}$$

谐振频率 W_n 与对应的电长度 θ 存在如下关系：

$$\theta=\beta_n l=\beta_n Np=(\frac{2\pi}{\lambda})(\frac{n\lambda}{2})=n\pi \tag{7}$$

联立式（6）和式（7）可求得各阶谐振器的谐振频率 W_n：

$$W_n=\sqrt{\frac{1}{L_R}[\frac{2}{C_R}(1-\cos\frac{n\pi}{N})+\frac{1}{C_L}]} \tag{8}$$

其中：$n=0,1,2,3,...+\infty$

式中，n、β_n、N、分别为谐振阶数、相位常数、单元个数与单元长度。由（8）式可看出，增大右手电感 L_R，增大右手电容 C_R，增大左手电容 C_L 可降低谐振频率。故本设计采用较高介电常数介质材料，减小 CRLH 贴片单元间隙 g，降低谐振频率，以实现天线的小型化。

2　低剖面天线单元设计

2.1　宽带低剖面天线

本设计采用介电常数为 6.15 的 Rogers RT6006 作为复合左右手结构的介质基板，厚度为 $h=6$ mm。CRLH 单元边长 $w=7.6$ mm，单元间隙 $g=0.6$ mm，通过正方形单元的间隙引入左手电容，实现左手特性。CRLH 结构色散图采用布里渊区法绘制。利用 HFSS 软件中的本征模求解器，根据布里渊区法使波矢历遍整个 CRLH 单元，进而求得其色散曲线。由于 CRLH 单元为完全对称结构，且作为辐射单元时电磁波主要沿 X，Y 方向传播，故绘制色散图仅考虑一个方向即可。图 1（a）为 HFSS 软件中绘制色散图的模型。模型最下方为 CRLH 单元，外围由横截面积与 CRLH 单元介质基板相等的空气盒子包围，空气盒子高度一般为 CRLH 单元高度的 6 － 8 倍，在空气盒子最上层设置理想匹配层，以防止反射波的影响。连同理想匹配层，在模型的最外围设置两对主从边界，并在两对主从边界间设置相位延迟 phase1，phase2。由于仅需考虑一个方向，故 phase1 由 0°增加到 180°，phase2 保持 0°不变，利用 HFSS 软件中的参数扫描功能进行计算。本节中的 CRLH 单元色散图如图 1（b）所示，图中虚线为 CRLH 单元的色散图，两直线由上一节中公式（4）、公式（5）求得。根据上一节中宽带低剖面天线的设计原理可得，两直线与 CRLH 单元色散曲线的交点即为天线谐振频率：$TM_{10}=3.17$ GHz，$TM_{20}=4.02$ GHz。

该天线采用缝隙耦合馈电，天线结构及各部分尺寸如图 2 所示，最上层为 CRLH 结构的周期性贴片，向下依次为 CRLH 结构的介质基板、地板与馈电微带线，在地板上开有矩形耦合缝隙，缝隙的位置为 CRLH 周期型结构中心缝隙的正下方。地板上的缝隙与其正上方的 CRLH 单元间的缝隙可使缝隙两侧电场反相，由此激励起反相 TM_{20} 模，实现宽带特性。天线采用缝隙耦合馈电结构，这种馈电方式能有效抑制馈电微带线对辐射单元的影响。

根据上一小节的理论分析，由公式（8）可得，减小 CRLH 贴片单元间隙可降低谐振频率。图 3 展示了超材料单元上层贴片间隙 g 取不同值时天线的阻抗带宽与谐振频率的变化情况。由图可得，随着 CRLH 单元贴片间隙的减小，天线阻抗带宽与谐振频率向低频移动，并且相对带宽增大，根据该规律，经过优化计算，最终选取 $g=0.6$ mm。该天线尺寸 40 mm，约为 $0.47\lambda_0$ 剖面高度 6.813 mm，约为

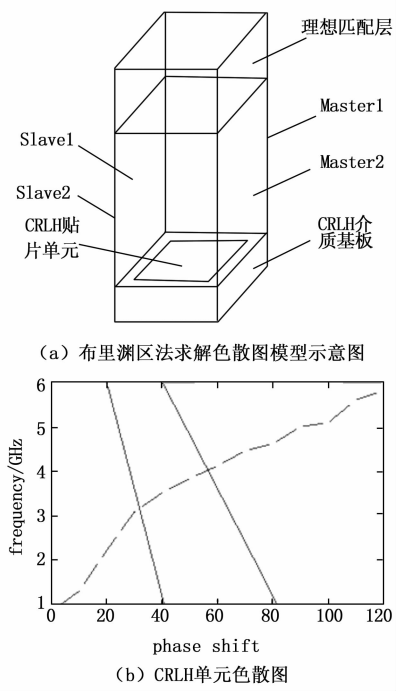

图 1 CRLH 结构色散图

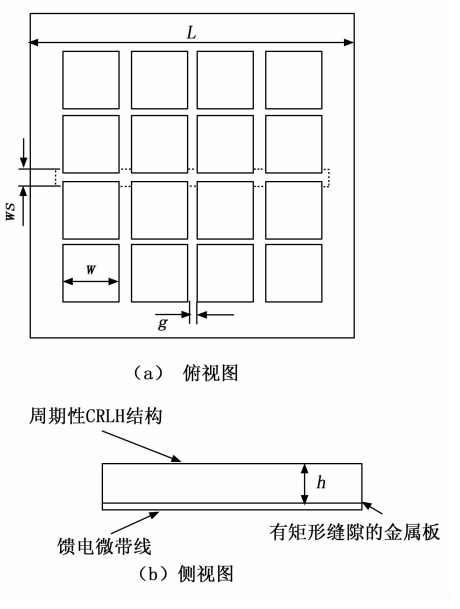

图 2 宽带低剖面天线结构示意图

0.08λ_0（λ_0 为中心频点在真空中对应波长）。地板上矩形耦合缝隙初始长度大致等于辐射单元总长度，宽度大致为长度的十分之一。微带线的开路端长度初始值选取为波导波长的四分之一。矩形耦合缝隙的长度对天线输入阻抗有重要影响，长度增大，耦合量增大，天线输入阻抗变大。而馈电微带线的开路端长度对矩形耦合缝隙引入的电抗起补偿作用，调整矩形耦合缝隙的长宽与馈电微带线开路端长度实现阻抗匹配。当矩形耦合缝隙长度 ls＝31 mm，宽度 ws＝1.4 mm，开路短截线长度 l_1＝ 14 mm 时，端口反射系

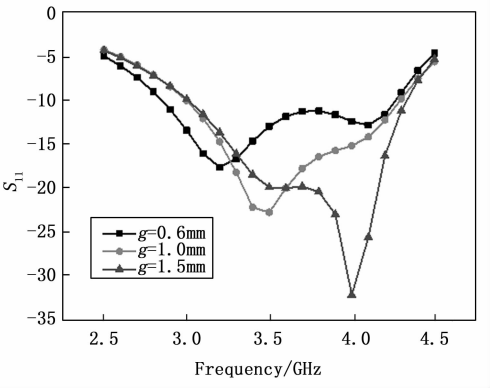

图 3 天线阻抗带宽随超材料单元间隙变化情况

数小于－10 dB（2.85～4.26 GHz）满足设计要求，天线驻波特性与方向图如图 4 所示。

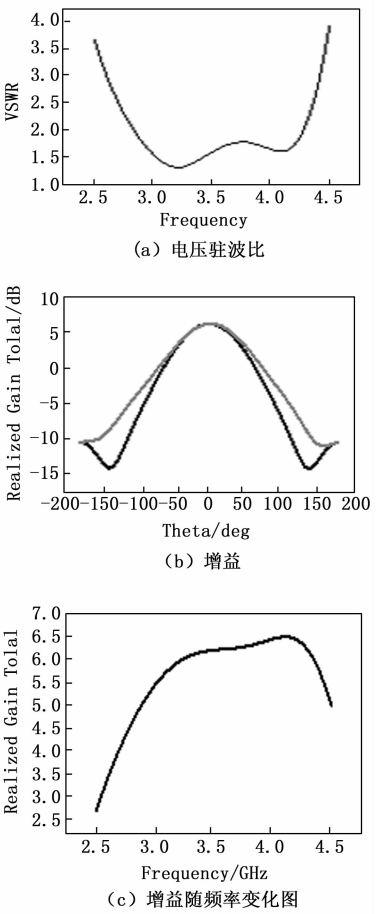

图 4 宽带低剖面天线 HFSS 仿真结果

通过仿真结果可看出，端口 S 参数呈现“W”型，实现了两种模式谐振频率的融合，阻抗带宽为 2.85 ～ 4.26 GHz，相对带宽为 40%，增益 6.31 dBi，波束宽度约为 90°±10°，并且该天线尺寸较小，仅为 0.47λ_0(0.47λ_0(0.08λ_0，可作为宽角扫描相控阵天线的阵元。

2.2 低剖面双极化天线

上述设计为单线极化天线，不具备双极化天线抗干扰

能力强、极化复用、极化捷变和收发同工等优点。由于上述 CRLH 结构为完全对称结构，x，y 方向完全等效，故该结构可应用于双极化天线的设计，下面利用上一小节中宽带低剖面天线设计原理，设计低剖面双极化天线。由于反相 TM_{20} 模的激励要求耦合缝隙必须在 CRLH 结构中心缝隙的正下方，并且要实现双极化特性，故十字形矩形缝隙为首选结构。电场通过两相互正交的矩形缝隙耦合至辐射单元。低剖面双极化天线结构及尺寸如图 5 所示。

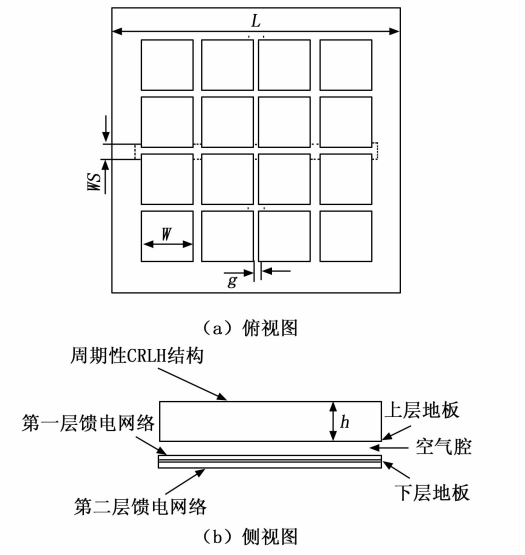

图 5　低剖面双极化天线结构示意图

最上层为 CRLH 结构的周期性贴片，向下依次为 CRLH 结构的介质基板、上层地板、空气层、第一层馈电网络、下层地板、第二层馈电网络。其中上下两层地板上都开有十字形缝隙，且二者投影重合。上下两层馈电网络激励下层地板上的缝隙，通过空气层使上层地板上产生耦合电流，上层地板上的缝隙将电流耦合到辐射贴片上。由于馈电网络与辐射单元之间存在地板，这种缝隙耦合馈电方式大大降低了馈电网络对辐射单元的影响。馈电网络由两个等幅同相的 T 形功分器组成，功分器耦合臂的初始位置为十字形缝隙长度的四分之一处，开路短截线的长度为微带线波导波长的四分之一。通过调整缝隙的长宽、耦合臂的位置、开路短截线的长度实现阻抗匹配。当十字形缝隙尺寸为 32 mm 时达到设计要求。该低剖面双极化天线驻波特性与方向图如图 6 所示。

由图 6 可看出，天线有良好的驻波特性，阻抗带宽为 2.98～4.16 GHz，相对带宽为 33 %，增益 6.40 dBi，异极化隔离大于 55 dB，0°交叉极化大于 65 dB，±60°交叉极化大于 40 dB。该天线尺寸为 40 mm，仅为 $0.488\lambda_0 \times 0.488\lambda_0 \times 0.096\lambda_0$，其中 λ_0 为中心频率在真空中对应波长。

2.3　±45°宽带低剖面双极化天线

目前移动通信都是采用±45°双线极化天线，针对移动通信需求，设计了一种低剖面宽带双极化天线。由于把辐射单元旋转 45°后，受介质、地板边界的影响，十字形缝隙

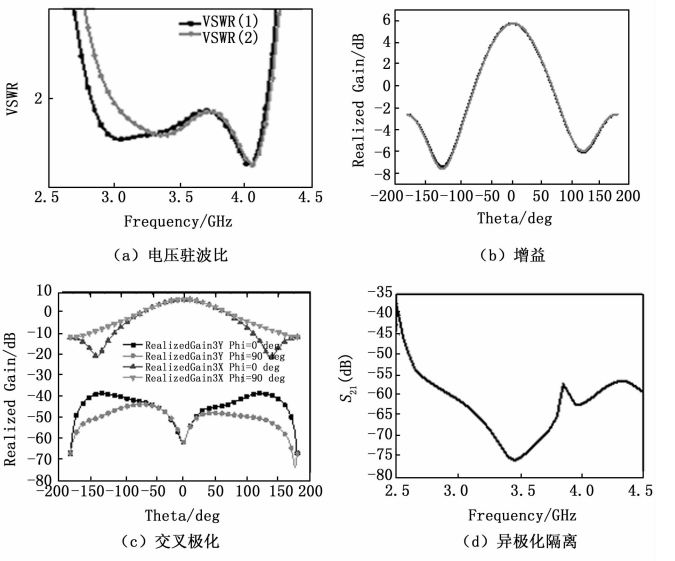

图 6　低剖面双极化天线 HFSS 仿真结果

相连通区域耦合严重，导致贴片上电流方向不纯，使隔离与交叉极化发生恶化，为解决该问题，本设计采用中间不连通的十字形缝隙，降低两缝隙间的耦合，改善隔离与交叉极化[10]。此外，本设计简化了上一节中双极化天线结构，去掉空气层，使 CRLH 结构与耦合缝隙共用同一层地板，进一步降低天线剖面高度，使天线更易于加工，天线结构如图 7 所示。

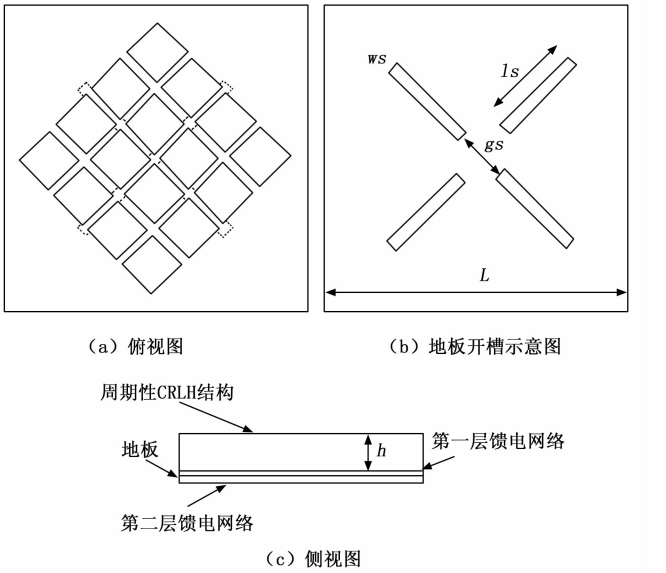

图 7　宽带低剖面双极化天线结构示意图

天线由上到下依次为 CRLH 结构周期性单元、介质基板、第一层馈电网络、开有耦合缝隙的地板、馈电层介质基板、第二层馈电网络。CRLH 单元尺寸 $w=6.6$ mm，$g=0.4$ mm，$h=4$ mm，介质基板同样采用介电常数 6.15 的 RT6006，边长为 42 mm。馈电层介质基板采用介电常数为 3.55 的 RO4003C，厚度为 0.508 mm。天线总高度为 5.016

mm，仅为 0.06λ_0（λ_0 为中心频率在真空中对应波长），馈电网络为两个等幅同相的 T 形功分器。耦合缝隙为四个不连通的矩形缝隙，缝隙长度对天线输入阻抗影响较大，缝隙变长，由馈电微带线馈入的耦合增加，天线输入阻抗增大，反之则减小，本设计单缝长度选取为 ls=16 mm。耦合缝隙的间距 gs 对端口隔离、交叉极化影响较大，缝隙间距必须大于单缝宽度，若间隙小于或者略大于单缝宽度，则四个相互正交的单缝会部分相连通或者单缝间距很小，这样单缝间仍然有较大的耦合，缝隙作用消失；但单缝间距也不宜过大，若单缝间距过大，会使馈电微带线与 CRLH 辐射单元边缘距离减小，产生多余耦合，使驻波和辐射特性发生恶化。经过优化设计，本设计的缝隙间距选取为 6 mm。由于两个极化的耦合缝隙是不连通的，减小了两个极化缝隙间的耦合，改善了隔离度与交叉极化。该天线驻波特性与方向图如图 8 所示。

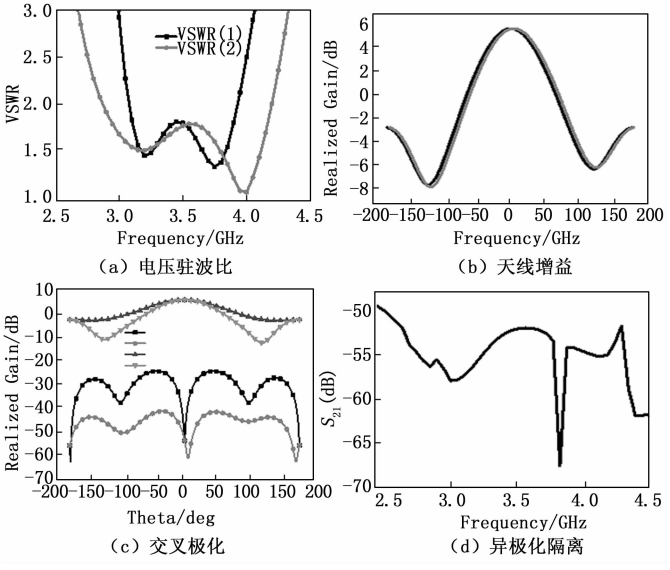

图 8 宽带低剖面双极化天线 HFSS 仿真结果

由图 8 可看出，天线有良好的驻波特性，阻抗带宽为 3.08～3.93 GHz，相对带宽为 24%，增益为 5.77 dBi，异极化隔离大于 50 dB，0°交叉极化大于 60 dB，±60°交叉极化大于 27 dB。不连通的十字形缝隙馈电对隔离与交叉极化有明显改善。此外该天线尺寸较小，仅为 0.49λ_0×0.49λ_0×0.058λ_0，其中 λ_0 为中心频率在真空中对应波长。天线波束宽度为 90°±10°，结合小型化的特点，该天线可应用于宽角扫描相控阵的阵元，为新一代移动通信天线设计提供了新的设计思路。

3 结束语

本文利用复合左右手结构色散图非线性的特性，结合微带天线传输线理论，实现两种模式相邻谐振点的融合展宽带宽，设计了基于 CRLH 结构的宽带低剖面天线；根据 CRLH 结构的对称特性设计了基于 CRLH 结构的低剖面双极化天线；利用四个不连通的相互正交矩形缝隙耦合馈电，减小不同极化间的耦合，改善隔离与交叉极化，设计了特性优良的宽带低剖面±45°双极化天线，该天线可进一步优化馈电结构，使得两极化驻波特性更加一直，可进一步拓展带宽。本文所给出的为三种宽带低剖面天线单元设计，进一步组阵分析为作者下一步研究工作。本文所设计的天线都具有良好的驻波、辐射特性，并且尺寸较小，可作为宽角扫描相控阵天线阵元，为第五代移动通信提供新的设计思路。

参考文献：

[1] 梅中磊，张 黎，崔铁军. 电磁超材料研究进展 [J]. 科技导报，2016，34 (18)：27－39.

[2] Estakhri N M and Alù A. Ultra－thin unidirectional carpet cloak and wavefront reconstruction with graded metasurfaces [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters，2014，13：1775－1778.

[3] 王 玖. 新一代移动通信双极化基站天线单元设计 [D]. 西安：西安电子科技大学，2017.

[4] 范仕祥. 宽带小型双极化印刷偶极子天线研究 [D]. 西安：西安电子科技大学，2017.

[5] 任 建. 人工磁导体材料在低剖面天线设计中的应用研究 [D]. 西安：西安电子科技大学，2014.

[6] Wei Liu，ZhiNing Chen，Xianming Qing，Metamaterial－Based Low－Profile Broadband Mushroom Antenna [J]. Antennas and Propagation，IEEE Transactions on antennas and propagation Vol，62，2016.

[7] Liu W，Chen Z N，Qing X M. Metamaterial－Based Low－Profile Broadband Aperture－Coupled Grid－Slotted Patch Antenna [J]. Antennas and Propagation，IEEE Transactions on antennas and propagation Vol，63，2015.

[8] Lai A，Itoh T，Caloz C. Composite right/left－handed transmission line meta－materials [J]. Microwave Magazine，IEEE，2004，5 (3)：34－50.

[9] Eleftheriades G V，lyer A K，Kremer P C. Planar negative refractive index media using periodically LC loaded transmission lines [J]. Microwave Theory and Techniques，IEEE Transactions on，2002，50 (12)：2702－2712.

[10] 卢 杰. 新型高隔离双极化微带天线与宽带共面 L 型探针耦合微带天线的研究 [D]. 南京：东南大学，2011.

[11] 李军伟，基于电容耦合左手材料的新型多频小型化微带天线设计 [D]. 成都：电子科技大学，2017.

[12] 李 艳. 基于复合左/右手传输线的多频小型化天线研究 [D]. 成都：西南交通大学，2014.

[13] 牛兵建. 基于复合左右手传输线的宽带高效率天线研究 [D]. 成都：西南交通大学，2011.

[14] 郑文泉，马岩冰，薛玲珑，等. 一种宽带低剖面动中通天线单元的设计 [J]. 无线电工程，2016，46 (12)：54－57.

[15] 王 亮. 一种低剖面宽带全向天线的设计 [J]. 无线电通信技术，2017，43 (2)：71－73.