

一种超表面技术的宽带化天线设计

彭宇, 刘宁川, 黄佳

中原电子集团有限公司研发三所, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年4月30日; 录用日期: 2022年6月2日; 发布日期: 2022年6月9日

摘要

本文提出了一款加载短枝节的宽带天线和基于超表面的多层宽带天线。前者通过在微带馈电线上加载短路枝节使得天线的带宽有所增加。在本文中通过在微带馈电线上加载短路枝节拓展了天线带宽。在尽量不改变平面尺寸的情况下, 加载双层覆着矩形贴片的介质基板使天线获得多频的特性。在多层结构的天线中加载超表面结构和金属反射板, 进一步的提升天线的带宽和增益, 并相对减小天线的平面尺寸, 从而达到了天线小型化、多频化、宽带化。

关键词

超表面, 宽带化, 多层结构

Design of Broadband Antenna Based on Super Surface Technology

Yu Peng, Ningchuan Liu, Jia Huang

Zhongyuan Electronics Group, The Third Research and Development Institute, Wuhan Hubei

Received: Apr. 30th, 2022; accepted: Jun. 2nd, 2022; published: Jun. 9th, 2022

Abstract

A broadband antenna loaded with short branches and a multilayer broadband antenna based on hypersurface are proposed in this paper. The former increases the bandwidth of the antenna by loading short-circuit branches on the microstrip feeder. In this paper, the antenna bandwidth is expanded by loading short-circuit branches on the microstrip feeder. Under the condition of not changing the plane size as much as possible, the antenna can obtain multi frequency characteristics by loading a double-layer dielectric substrate covered with rectangular patches. The super surface structure and metal reflector are loaded into the multi-layer structure antenna to further

improve the bandwidth and gain of the antenna, and relatively reduce the plane size of the antenna, so as to achieve the miniaturization, multifrequency and broadband of the antenna.

Keywords

Hypersurface, Broadband, Multilayer Structure

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

近些年来,随着天线的不断发展,关于波的辐射和传播的原理和特性,以及如何控制和激励电磁波的方法,人们已经掌握的比较完整,因此新出现的电磁超材料[1] [2] [3] [4]越来越受到人们的关注,但是超表面作为一个新出现的领域,其形式可以用二维形式也就是超表面来描述,在文献[5]中东南大学的崔铁军院士对电磁超材料的相关历史以及发展情况做了详细的叙述。关于超表面的研究内容主要集中在人工“原子”的亚波长尺寸单元周期或者非周期的排列结构上,超表面就是由这些结构组合而成,比较类似于二维材料。站在天线的角度来看,超表面上的每一个单元可以看作是一个电尺寸较小的天线,从入射的波中吸收能量,并重新发射波,从而形成了反射波。与此同时,在等效电路中,频率选择表面(FSS)的分析方法已经大量用在了超表面的设计当中[6]。超表面的很多理论都是基于天线的阵列理论[7],因此超表面和天线结合的越来越紧密,超表面结构也大量应用在了天线上。在文献[8]中,新加坡国立大学陈志宁团队提出了一种网格状的超表面结构,应用在微带缝隙天线上,通过缝隙对贴片进行辐射,并将贴片组成了超材料贴片单元阵列周期结构,最终获得了相对带宽为28%,增益为9.8 dBi的天线。随着超表面的不断发展,超表面在天线中的应用占据着越来越重要的位置,在文献[9]中详细介绍了超表面应用在天线上的进展,对增强天线性能的效果十分明显。由于超表面具有不同寻常的电磁特性,因此将其用于天线能够十分有效的改善天线的性能,比如在低剖面,带宽等,并且能够有效的使天线小型化,从而满足天线小型化、宽频化等需求。为了提升天线的增益,大多数情况下均采用阵列天线[10] [11]的结构,但是这样的结构的面积较大,并且设计过程中需要考虑到馈电网络等问题,比较复杂。因此为了进一步改善天线的增益,在尽量不增加面积的基础上,实现天线宽带化,多频化。本章中将采用缝隙耦合的馈电方式,并采用多层结构以及超表面结构和加载金属反射板设计一款宽带高增益的天线。

2. 微带缝隙天线原理

微带缝隙天线的结构主要由微带馈电线和在接地板上刻蚀的缝隙组成,微带馈电线通过介质基板与缝隙连接,微带馈电线在激励源的激励下,对介质基板另一侧的缝隙进行辐射,如图1所示。接地板上的缝隙的形状可以进行改变,从而可以根据缝隙的长度和宽度将缝隙天线分为窄缝天线和缝隙天线。当缝隙非常窄时,此时只有缝隙窄边的电场分量存在,通过等效原理,可以将缝隙等效成一个对称缝隙。为了让天线的辐射性能更好,可以在馈电线的一侧放一个平行于基板的金属反射板。在文献[12]中作者就关于金属反射板与缝隙之间的距离对天线的输入阻抗和辐射性能的影响做了相关探讨。因此可以通过调整金属反射板与缝隙之间的距离使天线获得更佳的匹配效果。

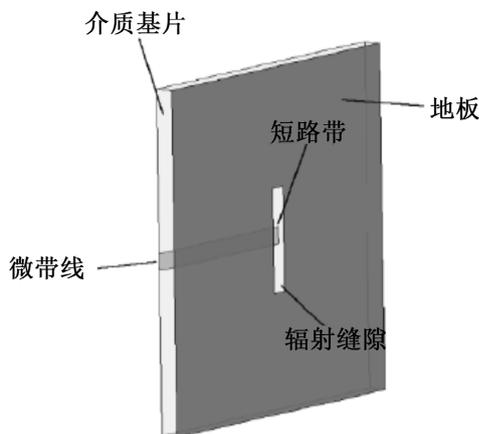


Figure 1. Microstrip slot antenna diagram
图 1. 微带缝隙天线图

3. 一种加载短枝节的宽带缝隙天线设计

由于微带缝隙耦合馈电的方式能够很好的将接地板与辐射层隔离开来，从而能够很好的避免了微带线馈电、同轴馈电方式所带来的电感效应，因此在本文采用缝隙耦合馈电的方式设计一款宽带缝隙天线。

3.1. 宽带缝隙天线的结构设计

如图所示加载树枝的宽带缝隙天线如图 2 所示。缝隙天线采用介电常数为 2.65， $\tan\alpha = 0.002$ ，厚度为 1 mm 的介质基板，介质基板的尺寸为 28 * 28 mm。十字形缝隙位于介质基板的顶层，加载短枝节的馈电线位于介质基板的底层。

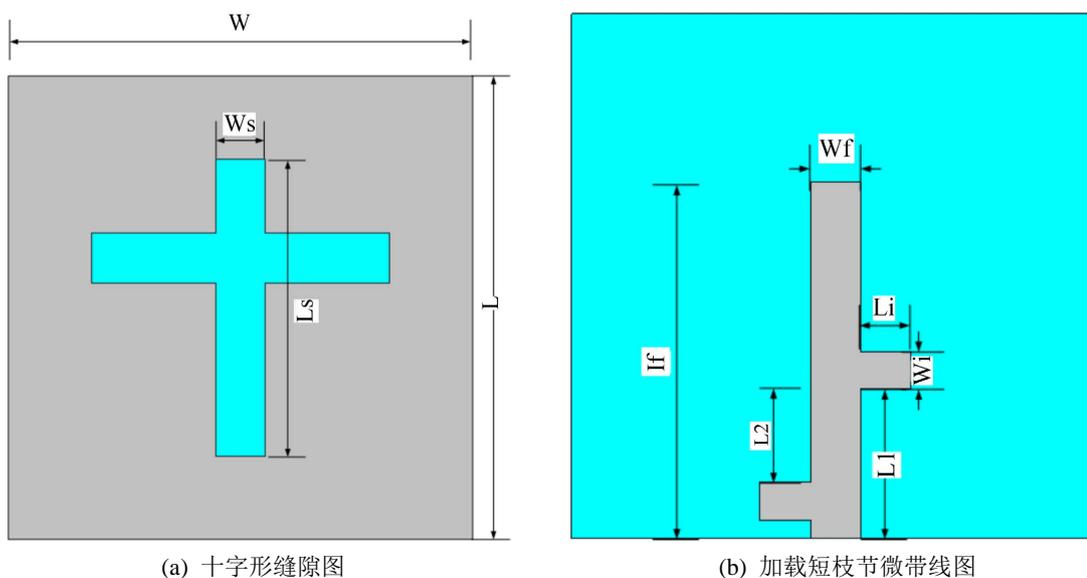


Figure 2. Plan view of slot antenna loaded with stubs
图 2. 加载短枝节的缝隙天线平面图

3.2. 天线仿真结果

如图 3 所示，十字形微带缝隙天线在加载短枝节以及未加载短枝节时的 S11 图，可以看出在微带线

上加载短路枝节后,天线的阻抗带宽得到了一定的提升,回波损耗的值明显增大。未加载短枝节时天线的工作频段范围为 5.37~6.25 GHz,阻抗带宽为 15%左右。加载短枝节天线的工作频段为 5.24~6.28 GHz,谐振频率为 5.85 GHz,阻抗带宽为 17%,基本能够覆盖 WLAN (5.15~5.85 GHz)频段范围。相对于未加短枝节的天线增加 2%左右。

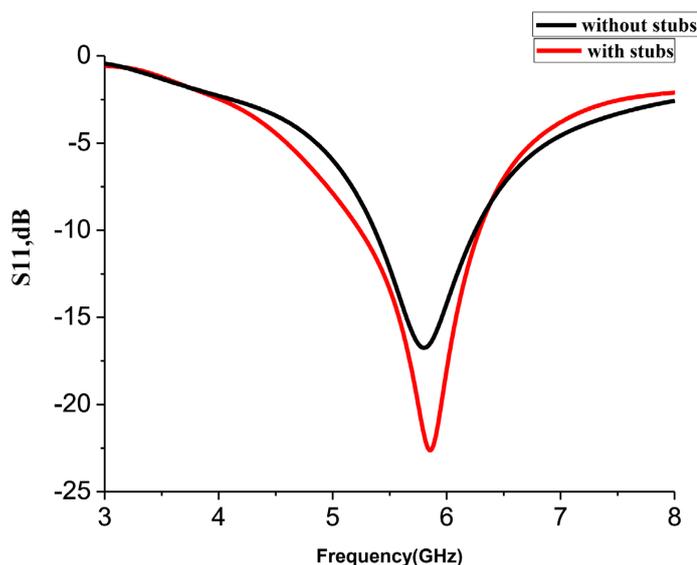


Figure 3. S11 diagram of loaded and unloaded branches

图 3. 加载枝节与未加载枝节的 S11 图

图 4 中给出了缝隙天线在 5.85 GHz 处的 E 面和 H 面方向图,根据图所示, E 面方向图近似可以看作一个圆, H 面方向图近似呈“8”字形,方向图符合微带缝隙天线的特性,即方向图和对称振子的方向图相同, E 面方向图和 H 面方向图互换。天线整体的辐射性能表现良好。

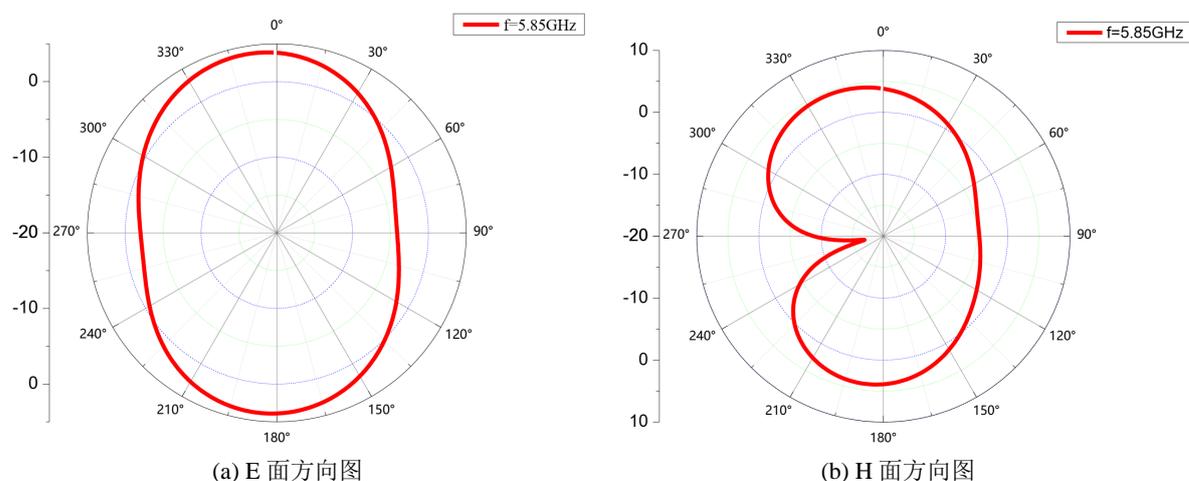


Figure 4. Antenna pattern at 5.85 GHz

图 4. 天线在 5.85 GHz 处的方向图

图 5 为缝隙天线的增益图。从图中可以看出天线随着频率逐渐增大,增益也随之增大。天线的平均增益大概在 3.5 dB 左右,基本上满足了通信系统的需求,可以很好的应用于 WLAN 频段中。

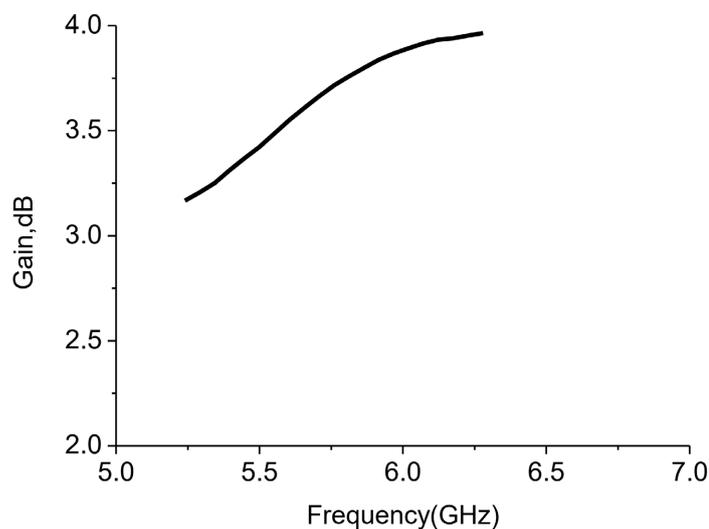


Figure 5. Gain diagram of antenna
图 5. 天线的增益图

4. 基于超表面的宽带天线的设计

在上文中设计了一款宽带缝隙天线，可以很好的应用于 WLAN 频段中，但是为了进一步的拓宽带宽和增益，因此采用多层的结构。在目前大多数天线通过采用阵列的方式来提升，但是阵列天线中辐射单元的叠加，不仅增加了天线的体积，还增加了成本，以及结构较为复杂。为了使天线小型化的同时，在多频、宽带、增益之间取一个平衡，因此本文设计了一款基于超表面的多层宽带天线。

4.1. 天线的结构

本文中的天线主要由四层结构构成，在最底层主要是一块 $L_r * L_r$ 铝制的矩形金属反射板，中间层是十字形的微带缝隙天线，介质基板的尺寸为 $L * W$ ，相对介电常数为 2.65，厚度 H 为 1 mm，缝隙天线与金属反射板的间距为 H_1 。缝隙天线的上面是由两块尺寸同样为 $L * W$ 的 FR4 介质基板构成，相对介电常数为 4.4，损耗正切角为 0.02，厚度 H_r 为 1.6 mm。在每层的介质基板上都覆着一个均匀分布的 $4 * 4$ 的正方形贴片单元阵列，两层介质基板的距离为 H_3 ，缝隙天线与第一层 FR4 介质基板的间距为 H_2 ，每层之间的介质均为空气。通过 CST 进行建模仿真，并对相关参数进行优化，最终得到性能良好的天线。最终天线的具体参数如表 1 所示，天线的结构如图 6 所示。

Table 1. The parameter value table of the antenna
表 1. 天线的参数值表

L	W	H	Lf	Wf	Ls	Ws	H1	L2	L1
28 mm	28 mm	1 mm	19 mm	2.66 mm	18 mm	3.2 mm	12 mm	5 mm	8 mm
H2	H3	Hr	Wr	Lr	G1	Lc	Li	Wi	
3 mm	2.5 mm	1.6 mm	36 mm	36 mm	0.3 mm	5 mm	3.67 mm	12 mm	

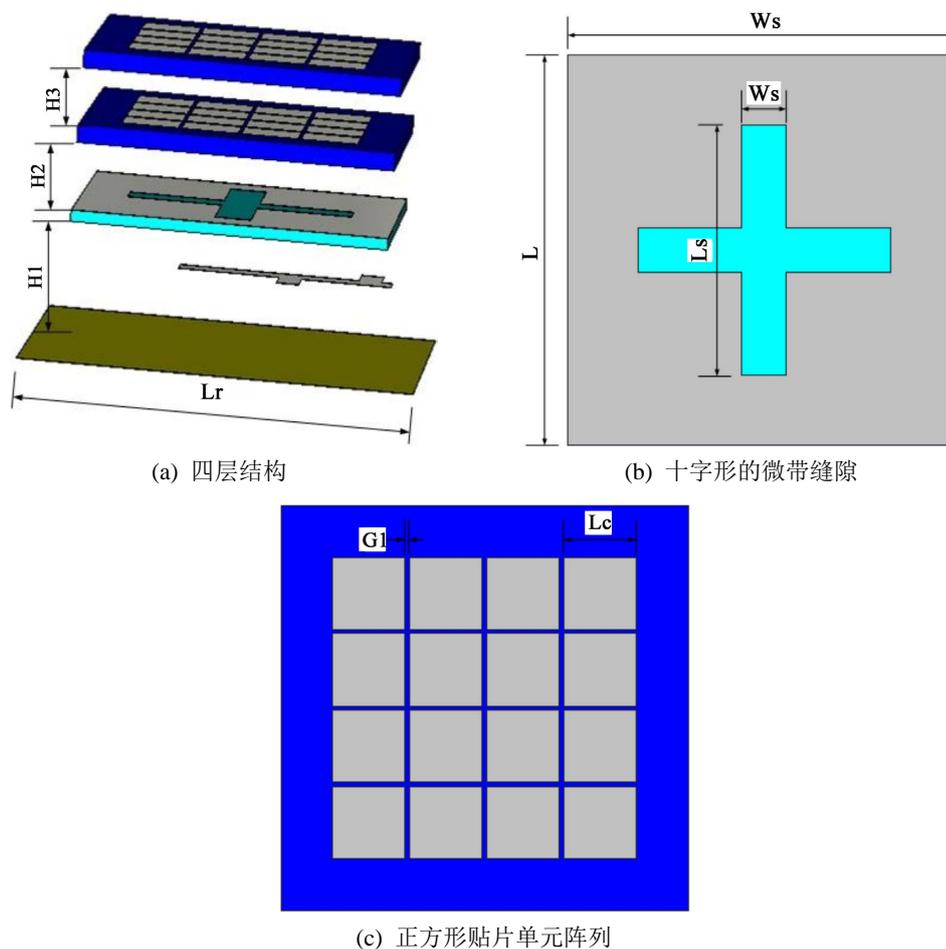


Figure 6. Diagram of a metasurface-based multilayer antenna
图 6. 基于超表面的多层天线图

4.2. 天线的设计过程

天线的设计过程如图 7 所示，图 7(a)为加载短枝节的缝隙天线 A，图 7(b)为加载覆着矩形贴片的双层介质基板的缝隙天线 B，图 7(c)为加载超表面的双层介质基板的缝隙天线 C，图 7(d)为加载金属反射板的多层缝隙天线 D。通过电磁仿真软件 CST 对图 7 中的结构进行仿真，其 S 参数和增益如图 8，图 9 所示。从图中可以看出加载多层结构的天线 B 产生了多频的特性，带宽有一定的增加。加载超表面结构的的天线 C 相比于天线 B 的带宽有明显的增加，尤其是在中高频段处的带宽，并且回波损耗的数值变大。加载金属反射板结构的的天线 D 相比于天线 C，低频段的带宽有明显的增加，并且天线的增益提升明显，在高频段处有显著的提升，大约 2 dB 左右。

4.3. 天线的性能分析

在天线 A 中，为了改善缝隙与微带馈电线之间的耦合作用，通过调整在上节天线中的缝隙位置来改善耦合的程度，使得缝隙中的耦合作用更强，因此便将十字形的缝隙的位置进行调整，从而改善天线的匹配，并拓展了天线的带宽。在天线 B 中，由于加载了多层结构，虽然天线的高度有所增加，但是在平面上天线的尺寸并没有增加。通过在介质基板上加载辐射单元，并用空气进行隔开，辐射贴片通过相互间的耦合作用，产生了谐振，进而拓展了带宽。在天线 C 中，由于加载超表面结构，超表面上的矩形贴片构成了一个

平面阵列，从图 8 中可以看到 S11 中有三个谐振点，在中高频处的两个谐振点主要是由多层结构作用本身产生的谐振点，而在高频处的谐振点主要是由贴片阵列上的表面波所产生的谐振点，随着频率的增大，天线的增益提升也更加明显。在天线 D 中，由于在多层的基础上在底部放置金属反射板后，进一步改善了天线的辐射性能，使得缝隙天线辐射产生的电磁波通过金属反射板反射回来，使得天线在低频处产生谐振，带宽相应得到增加。金属反射板使得天线整体的辐射范围增加，从而改善了天线在高频处的增益。相较于文献[13]中采用串联馈电网络的阵列天线相比，在尺寸更小的情况下，拥有更大的带宽，并且增益值较高也比较稳定。文献[14]中采用并联馈电网络的阵列天线，虽然能够获得较高的增益，增益相比本文中的天线高出 6 dB 左右，但是带宽较窄，并且尺寸比较大。

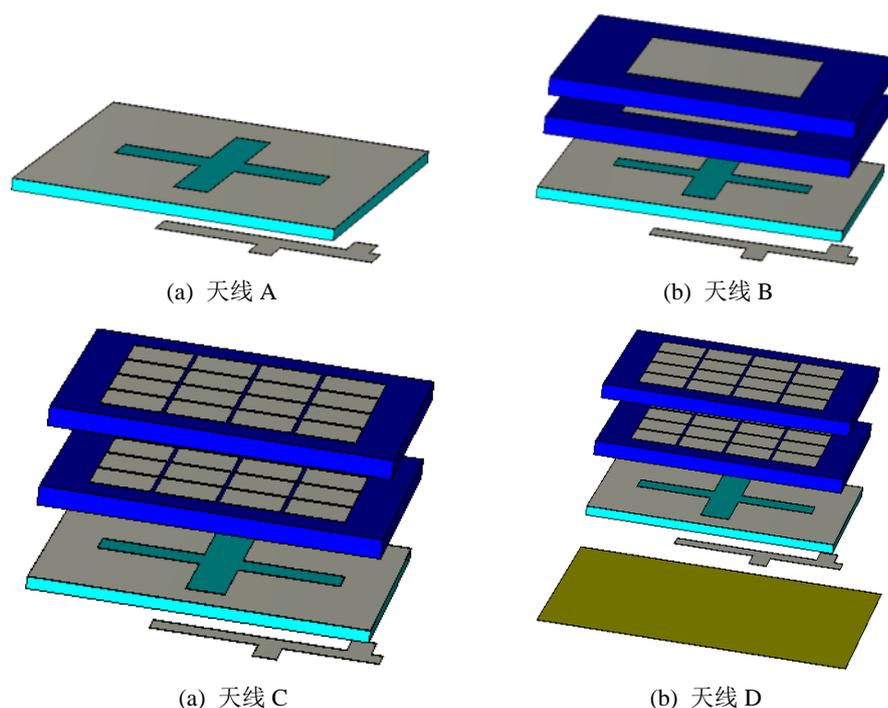


Figure 7. The design process diagram of the antenna
图 7. 天线的设计过程图

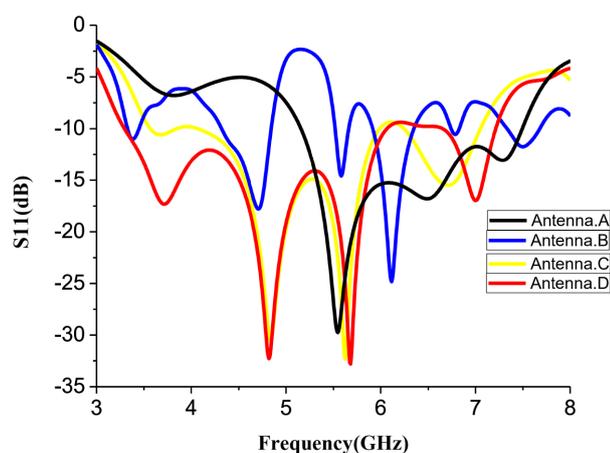


Figure 8. S11 diagram of antennas A, B, C, D
图 8. 天线 A, B, C, D 的 S11 图

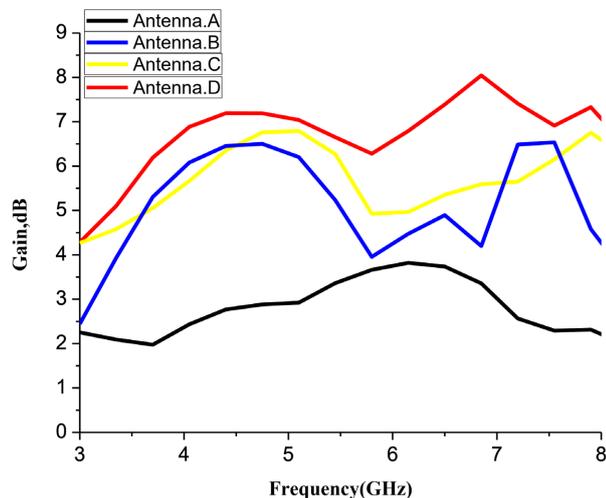


Figure 9. Gain diagram for antennas A, B, C, D
图 9. 天线 A, B, C, D 的增益图

根据图 10 和图 11 所示,在 5.67 GHz 天线在超表面上和缝隙处的电流分布图,可以看出天线在 5.67 GHz 处的谐振主要由缝隙间的耦合作用以及超表面结构作用产生的。在 0° 和 90° 相位时,电流路径的方向相互垂直的。

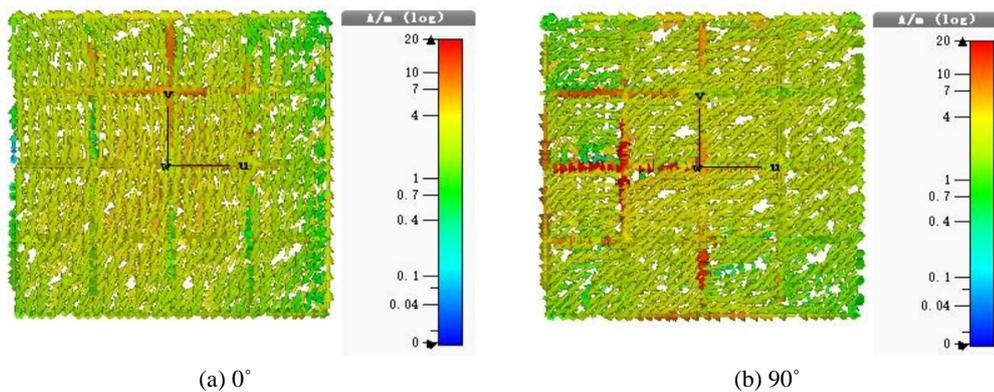


Figure 10. Surface current distributions of the antenna at 5.67 GHz with the metasurface at 0° and 90° phase
图 10. 天线在 5.67 GHz 处超表面在 0° 和 90° 相位时的表面电流分布图

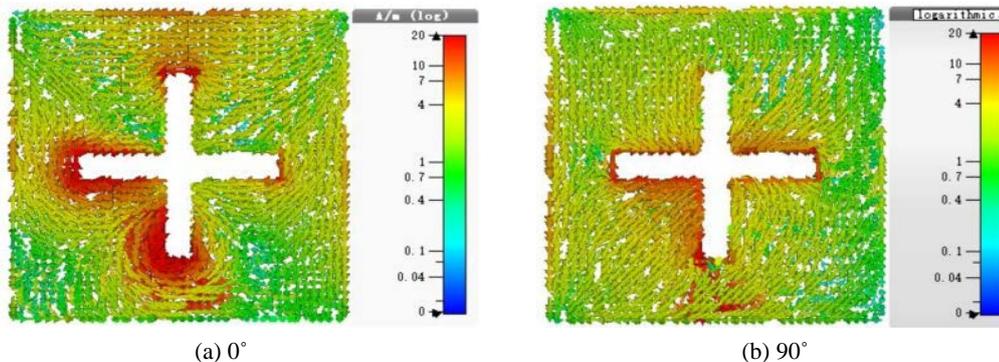


Figure 11. Surface current distributions of the antenna at 5.67 GHz with slot at 0° and 90° phase
图 11. 天线在 5.67 GHz 处缝隙在 0° 和 90° 相位时的表面电流分布图

图 12~15 中分别为天线在 3.7 GHz, 4.75 GHz, 5.67 GHz, 6.9 GHz 处的 E 面和 H 面方图, 从图中可以看出天线的辐射主要集中在空间的上半部分中, 天线在较高的频段时, 出现了较为明显的后瓣, 但是后瓣较小。天线在各个频段上的方向图较为稳定, 方向性近似, 辐射特性良好。

4.4. 天线参数的分析

由于天线采用超表面的结构, 需要考虑到超表面贴片单元尺寸 L_c 和贴片单元之间的间距 G_1 对天线性能的影响。另外也需要考虑贴片数目的选取对天线性能的影响, 因此对参数 L_c , G_1 以及贴片的数目进行分析。从图 16 中可以看出随着 G_1 的不断增大, 天线在低频段的带宽有一定的减小, 从整体上看, 贴片之间的距离对 S_{11} 的影响不是特别大, 由于整体尺寸并不是很大, 因此对于 G_1 数值的选取的范围较小。通过仿真观察后, 选择 $G_1 = 0.3 \text{ mm}$ 能够使天线在低频段处的性能更佳, 同时对天线的其它性能也不会有影响。

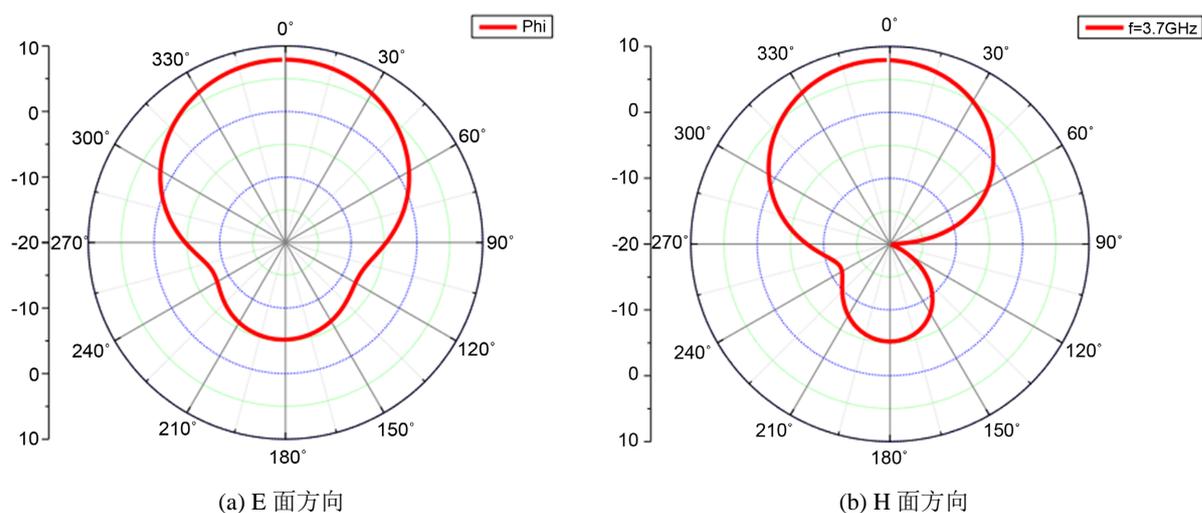


Figure 12. (a) E-plane pattern at 3.7 GHz; (b) H-plane pattern at 3.7 GHz
图 12. (a) 3.7 GHz 处 E 面方向图; (b) 3.7 GHz 处 H 面方向图

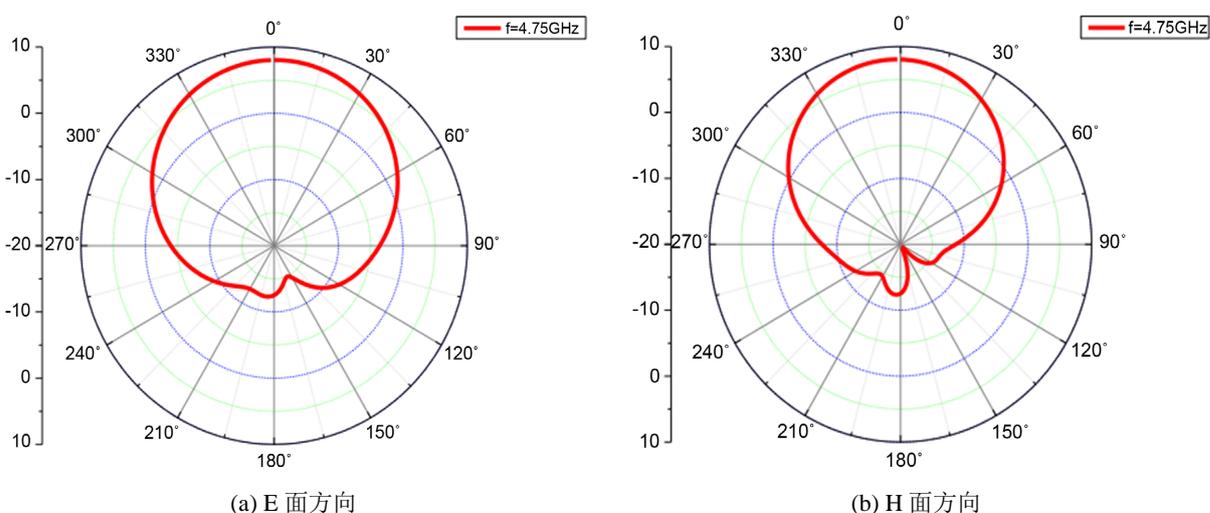


Figure 13. (a) E-plane pattern at 4.75 GHz; (b) H-plane pattern at 4.75 GHz
图 13. (a) 4.75 GHz 处的 E 面方向图; (b) 4.75 GHz 处的 H 面方向图

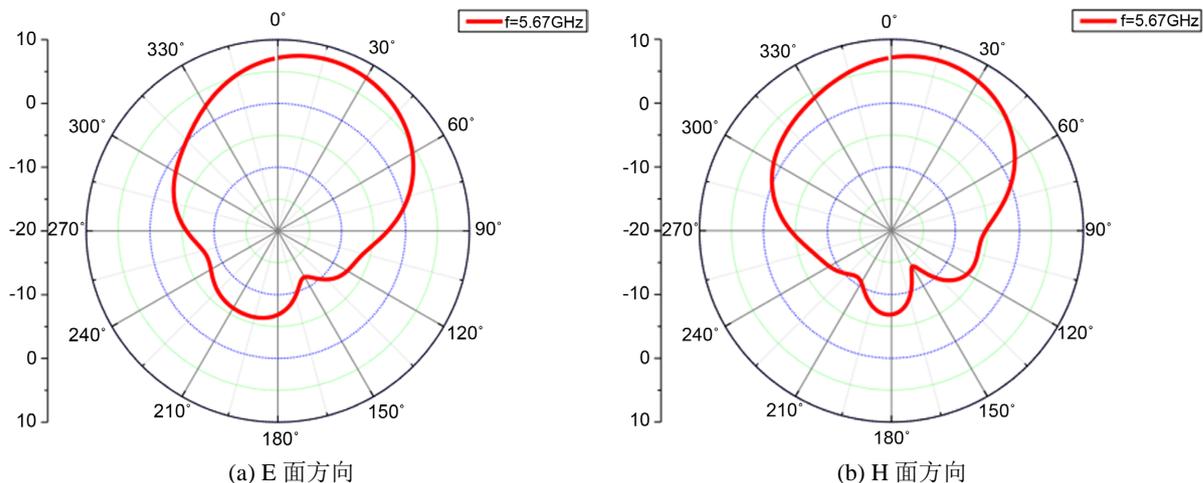


Figure 14. (a) E-plane pattern at 5.67 GHz; (b) H-plane pattern at 5.67 GHz
 图 14. (a) 5.67 GHz 处 E 面方向图; (b) 5.67 GHz 处 H 面方向图

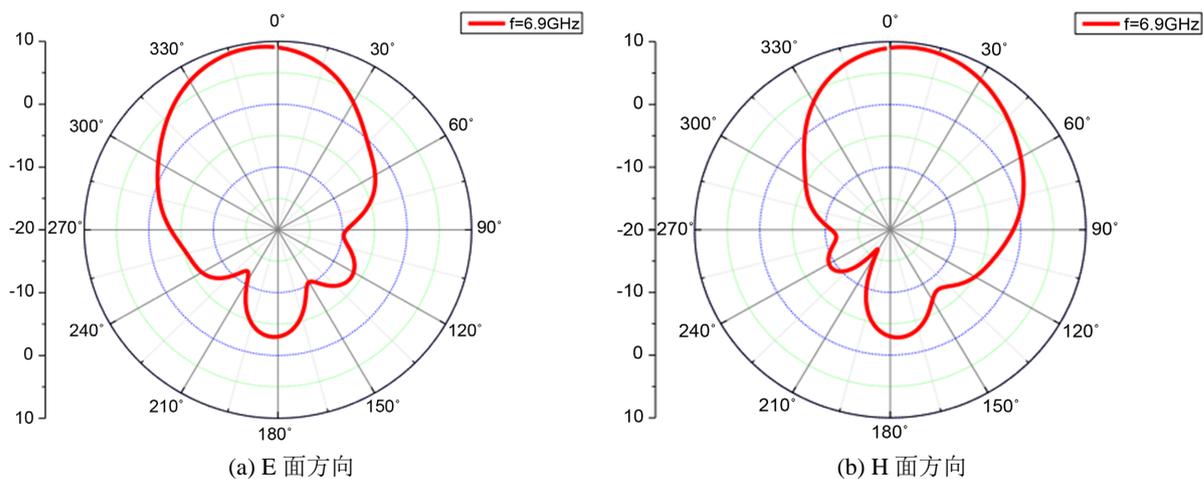


Figure 15. (a) E-plane pattern at 6.9 GHz; (b) H-plane pattern at 6.9 GHz
 图 15. (a) 6.9 GHz 处 E 面方向图; (b) 6.9 GHz 处 H 面方向图

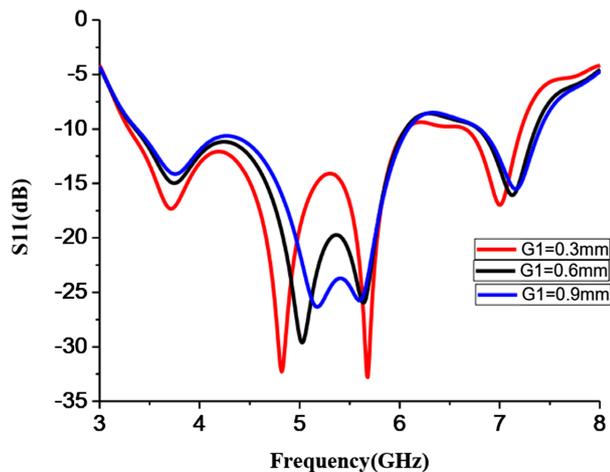


Figure 16. S11 plot for different G1 values
 图 16. 不同 G1 值下的 S11 图

从图 17 中可以看出,超表面贴片单元的尺寸 L_c 的取值对 S_{11} 的影响比较大, L_c 取值过大或者过小,都会使天线的谐振频率发生明显的改变,通过调整 L_c 的尺寸,使得天线可以获得多个频段。但是为了让整体的性能能够得到平衡,因此选取 $L_c = 5 \text{ mm}$ 。从图 18 中可以看出,贴片数量越多,天线的带宽有一定的提升,但是贴片数量过多会影响超表面上的表面波的传播,从而对天线的其它性能造成影响,因此选择 4×4 的贴片阵列。

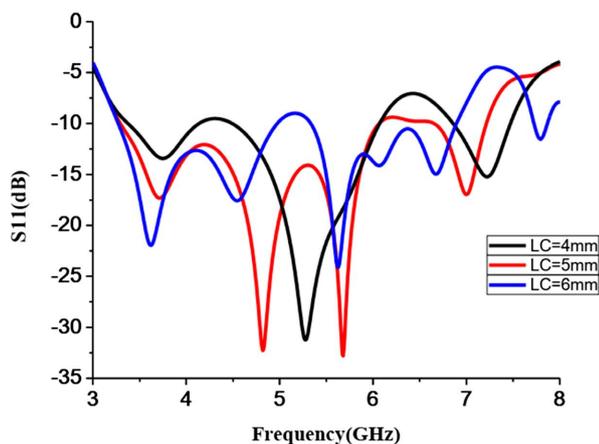


Figure 17. S_{11} diagram under different L_c values

图 17. 不同 L_c 值下的 S_{11} 图

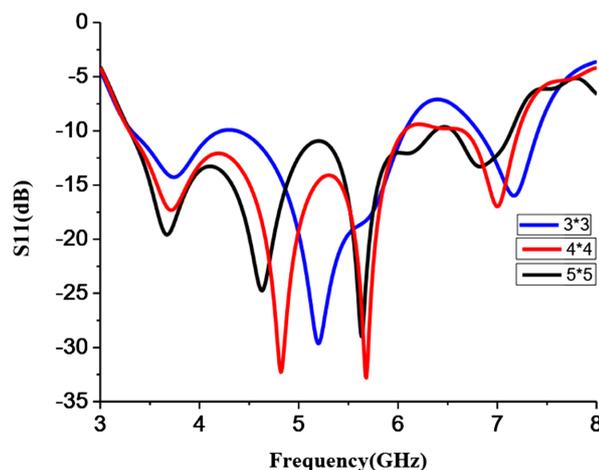


Figure 18. S_{11} diagram under different number of patches

图 18. 不同贴片数目下的 S_{11} 图

5. 结论

通过理论分析和模型仿真,提出了一款加载短枝节的宽带天线和基于超表面的多层宽带天线。前者通过在微带馈电线上加载短路枝节使得天线的带宽有所增加。基于超表面的多层宽带天线的工作频段为 $3.3\sim 6.0 \text{ GHz}$, $6.65\sim 7.2 \text{ GHz}$, 相对带宽分别为 58% , 8% 。 $3.3\sim 6.0 \text{ GHz}$ 频段内天线的平均增益在 6 dB , 在 $6.65\sim 7.2 \text{ GHz}$ 频段内天线的平均增益为 7 dB 。在本文中通过在微带馈电线上加载短路枝节拓展了天线带宽。在尽量不改变平面尺寸的情况下,加载双层覆着矩形贴片的介质基板使天线获得多频的特性。在多层结构的天线中加载超表面结构和金属反射板,进一步的提升天线的带宽和增益,并相对减小天线的平面尺寸,从而达到了天线小型化、多频化、宽带化。

参考文献

- [1] Pendry, J.B., Holden, A.J., Stewart, W.J., *et al.* (2002) Youngs. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Me-
sostructures. *Physical Review Letters*, **76**, 4773-4776. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4773>
- [2] 吴瑞元, 崔铁军. 电磁超材料: 从新物理现象到新信息系统(英文) [J]. 信息技术与电子工程前沿, 2020, 21(1):
4-27.
- [3] Schurig, D., *et al.* (2006) Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies. *Science*, **314**, 977-980.
<https://doi.org/10.1126/science.1133628>
- [4] Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., *et al.* (2002) Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability
and Permittivity. *Physical Review Letters*, **84**, 4184-4187. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>
- [5] 崔铁军. 电磁超材料-从等效媒质到现场可编程系统[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(10): 1427-1461.
- [6] Munk, B. (2000) Frequency Selective Surfaces-Theory and Design. Wiley, Hoboken, NJ.
<https://doi.org/10.1002/0471723770>
- [7] Chen, A., Zhang, Y., Chen, Z., *et al.* (2011) Development of a Ka-Band Wideband Circularly Polarized 64-Element
Microstrip Antenna Array with Double Application of the Sequential Rotation Feeding Technique. *IEEE Antennas and
Wireless Propagation Letters*, **10**, 1270-1273. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2175433>
- [8] Liu, W., Chen, Z.N. and Qing, X. (2015) Metamaterial-Based Low-Profile Broadband Aperture Coupled Grid-Slotted
Patch Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **63**, 3325-3329.
<https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2429741>
- [9] Wang, J., *et al.* (2020) Metantenna: When Metasurface Meets Antenna Again. *IEEE Transactions on Antennas and
Propagation*, **68**, 1332-1347. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2969246>
- [10] Maddio, S., Pelosi, G., Righini, M., *et al.* (2019) A Compact Series Array for Vehicular Communication in the C-Band.
2019 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Atlanta,
GA, 7-12 July 2019, 1337-1338. <https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888755>
- [11] Cao, T.N. and Krzysztofik, W.J. (2018) Design of Multiband Sierpinski Fractal Carpet Antenna Array for C Band.
2018 *22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, Poznan, 14-17 May 2018, 41-44.
<https://doi.org/10.23919/MIKON.2018.8405240>
- [12] Yoshimura, Y. (1972) A Microstripline Slot Antenna (Short Papers). *IEEE Transactions on Microwave Theory and
Techniques*, **20**, 760-762. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1972.1127868>
- [13] Song, X.D. (2009) Small CPW-Fed Triple Band Microstrip Monopole Antenna for WLAN Applications. *Microwave
and Optical Technology Letters*, **51**, 747-749. <https://doi.org/10.1002/mop.24166>
- [14] Antoniadou, M.A. and Eleftheriades, G.V. (2008) A Compact Multiband Monopole Antenna with a Defected Ground
Plane. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **7**, 652-655. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2008.2007813>