

基于电磁超材料的微带单极子天线设计

周仕彬¹ 陈 星¹

ZHOU Shibin CHEN Xing

摘 要

提出一种基于电磁超材料和枝节加载的低剖面、宽带、小型化无人机载天线,由两个不同大小的超材料传输线(MTLs)单元以及一对寄生枝节组成,引起不同频率下的谐振。对MTLs进行色散分析,结果表明,交趾电容的加入能降低一阶模式的谐振频率,使天线的电尺寸得到降低。当这两个谐振频率相互靠近到一定程度后开始合并,就可以大大拓展天线的带宽。同时,在天线上引入一个寄生枝节,会继续在天线带外增加一个额外的谐振点,通过改变寄生枝节的尺寸,调节引入的阻抗,使得额外增加的谐振点向着原工作频带靠近并合并,进一步增加了天线的工作带宽。实测结果表明,天线工作频带为1.32~2.65 GHz(相对带宽为67%),平均辐射效率为96.7%,最低工作频点对应的电尺寸为 $0.26\lambda_0 \times 0.13\lambda_0$ 。

关键词

宽带;小型化;超材料;枝节加载;高辐射效率

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.04.037

0 引言

电磁超材料是一种由亚波长单元组成的周期性或非周期性的结构,是一种人工电磁材料。与天然材料相比,其单元便于人工控制及操作,从而实现很多天然材料所不具备的超常功能^[1],例如负电容率和负磁导率等^[2]。超材料领域的先驱 Eleftheriades 教授^[3]从理论和实验上研究了利用人工电磁结构实现的负电容率和负磁导率的超材料。2009年, Eleftheriades 教授提出了一种采用双共振传输线超材料结构的紧凑平面天线,其效率达到了65.8%,但其相对带宽(-10 dB,下同)仅有3.1%^[4]。2010年, Jeong Keun Ji 等人提出了一种利用复合左右手材料扩展超材料天线带宽的方法,提出的天线最高辐射效率达到了66.6%,其带宽达到了20.3%^[5]。2015年, LIU Liangyuan 和 WANG Bingzhong 采用嵌有两条负曲流线的金属贴片作为主辐射器,形成了一个超材料传输线结构的的天线,该天线的相对带宽达到了21.5%,辐射效率最高为86.2%^[6]。

天线加载技术是指在天线结构中或附近引入一些附加的结构,利用这些结构与天线结构之间的耦合,改变天线的电性能和辐射性能,从而满足不同的需求,被广泛应用在天线设计中,分为无源加载和有源加载。本天线中的寄生枝节加载即是一种典型的无源加载技术。2015年, Tsenchieh Chiu 等人提出了一种加载分支结构的双频带可重构插槽天线,多谐振点的特点使其可以在多个频带内应用在GPS上^[7]。2016

年, WU Rui 等人提出一种由两个环形臂偶极子正交,并在环形臂内加载寄生贴片的天线。贴片的加入在高频处引入谐振点,使得该天线的-15 dB相对带宽为57.5%^[8]。2018年, SHANG Yunpeng 等人提出了一款加载金属条的树形分支超宽带天线,通过优化树形分支和加载条带的尺寸,可以实现大于76%的相对带宽,但其存在带内辐射效率突然递减的问题^[9]。2018年, ZHENG Zongliang 等人提出了一种基于电容加载技术的宽带射频识别双圆偏振天线,该天线的峰值增益为7.48 dBi,但其-10 dB相对带宽仅为21%^[10]。

目前,微带天线同时实现小型化、超宽带、高效率的特性一直是研究的难点和热点。在本文中,设计了一款基于左手材料的加载寄生枝节的超宽带高效率微带单极子天线。MTLs包含了一系列提供左手电容的交趾结构。两个不同尺寸的MTLs单元,在不同频率谐振,实现了宽阻抗带宽。寄生枝节的加载,引入了新的谐振点,通过调节寄生枝节的尺寸,进行调谐,与MTLs单元的谐振点合并,进一步拓展了阻抗带宽,实现了天线的宽带特性。该天线在工作频段内的仿真辐射效率最高达98.9%。

1 电磁超材料部分

所提出的天线结构如图1所示,其整个结构印制在FR4衬底的顶层。两个不同大小的MTLs单元与寄生枝节形成了辐射体,由共面波导馈电,整体呈单平面结构,易于与其它电路结构集成。在馈电处将传输线改为高低阻抗线形式,有助于改善阻抗匹配。

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610065

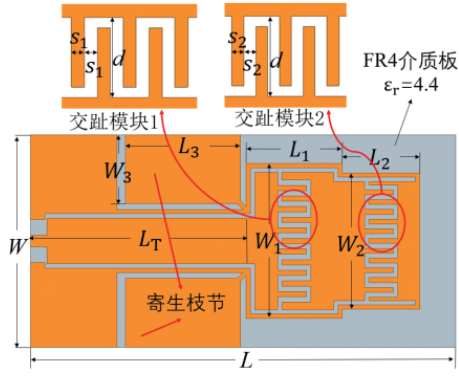


图1 所提出的天线结构示意图

该天线的交趾模块的等效电路如图2所示。两处蚀刻处的交趾模块，提供了左手电容 C_{se} 。该天线的等效辐射电阻用 R 表示。由于天线辐射体末端与地短路，将产生一个电感效应，用 L_d 表示。交趾模块与地之间存在的电容用 C_{pa} 表示。交趾模块本身的串联电感用 L_{se} 表示。

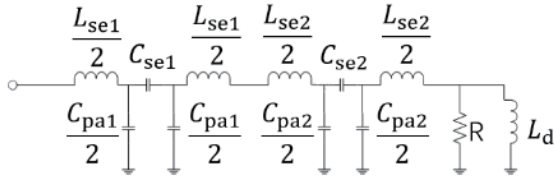


图2 天线交趾模块的等效电路

由图1可知，天线的两个交趾模块仅有尺寸上的区别，对每一个模块的分析方法是一样的，因此可以单独分析。首先，对图2中的等效电路用布洛赫-弗洛克定理^[11]进行分析，可以得到交趾模块单元的色散关系式：

$$\phi(\omega) = \beta(\omega)p = \cos^{-1}\left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \quad (1)$$

然后，根据传输线理论，交趾单元的阻抗 Z 和导纳 Y 计算公式为：

$$Z = j(\omega L_{se} - \frac{1}{\omega C_{se}}), \quad Y = j\omega C_{pa} \quad (2)$$

式中： p 为交趾单元的周期长度， Z 、 Y 分别为交趾单元的串联阻抗和并联导纳。

接着，将(2)式代入(1)式，色散关系式可表示为：

$$\phi(\omega) = \cos^{-1}\left(1 - \frac{\omega^2 - \omega_s^2}{2\omega_r^2}\right) \quad (3)$$

$$\text{式中: } \omega_s = \frac{1}{\sqrt{C_{se}L_{se}}}, \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_{pa}L_{se}}} \quad (4)$$

最后，通过以下等式分析交趾单元的谐振模式：

$$\phi(\omega) = \beta(\omega)p = n\pi \quad (n=0, \pm 1, \dots) \quad (5)$$

根据式(3)、(4)，当 $n=0$ 时， $\phi=0$ ，此时，激发零阶模式，交趾单元谐振在 $\omega_0=\omega_s$ ；当 $n=1$ 时， $\phi=\pi$ ，此时交趾单元谐振在 $\omega_{\pm 1}=\sqrt{4\omega_r^2 + \omega_s^2}$ 。由于本天线中的交趾结构，

是一种简化的电磁超材料结构，没有左手电容或电感^[12]，故而不存在负阶模式。

通过以上分析可知，左右手材料加载的天线谐振频率与其物理尺寸不再有直接的关系，不受传统开放谐振式天线的半波长限制，而仅由左右手材料结构的等效电容电感决定，因此要对天线调谐，只需对超材料结构的尺寸和耦合性等进行调节即可。

2 枝节加载部分

本文中加载的寄生枝节是一种基于分布参数的开路传输线，根据传输线理论，其输入阻抗为：

$$Z_{in}(l) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (6)$$

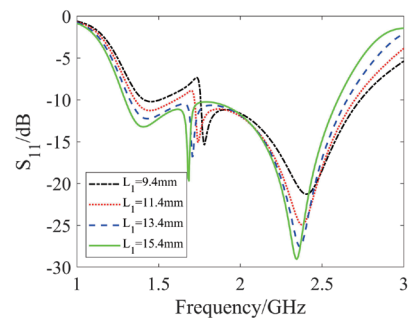
式中： Z_0 为传输线的特性阻抗， l 为传输线长度， Z_L 为传输线终端负载。对于文中加载的终端开路线， $Z_L \rightarrow \infty$ ，将这一结果代入式(6)可得：

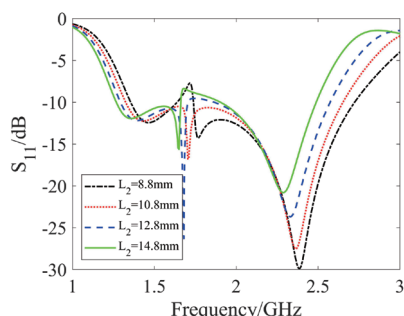
$$Z_{in}(l) = -jZ_0 \cot(\beta l) \quad (7)$$

由式(7)可知，加载寄生枝节可引入纯电抗，该电抗可以在一定频率范围内对天线的输入阻抗进行补偿，有利于在天线带外产生新的谐振点。由式(7)可知，可通过调节寄生枝节的特性阻抗和长度改变引入天线的电抗。另外，由微带线的特性阻抗表达式可知^[13]，对于给定介质材料和介质厚度的微带天线，可通过改变寄生枝节的宽度来调节寄生枝节的特性阻抗，进而调节寄生枝节引入的谐振频率。因此，在后续天线的设计过程中，可以改变寄生枝节（如图1所示）的长度 L_3 、宽度 W_3 来调节其引入的谐振点频率，使该谐振点与已有工作频段合并，从而扩展天线的工作带宽。

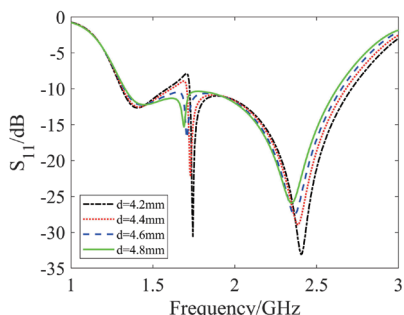
3 天线设计过程仿真

根据前文所述电磁超材料理论，交趾模块的电抗会影响到其谐振频率，因此对两交趾模块的长度（ L_1 与 L_2 ）、交趾深度（ d ）进行了分析，其结果如图3所示。同时，根据上述枝节加载理论，对寄生枝节尺寸的长度 L_3 、宽度 W_3 进行了分析，其结果如图4所示。

(a) L_1

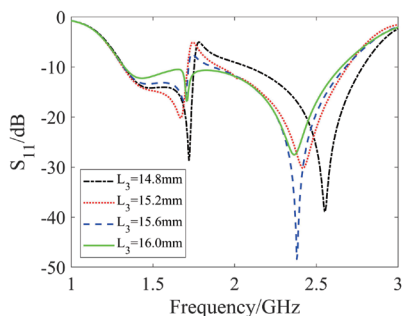


(b) L_2

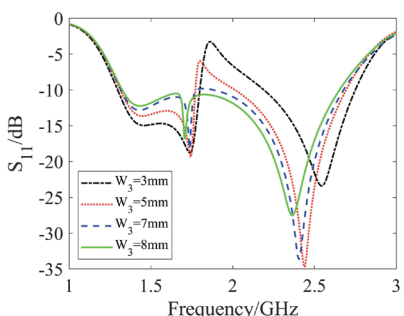


(c) d

图3 交趾尺寸对天线 S_{11} 系数的影响



(a) L_3



(b) W_3

图4 枝节尺寸对天线 S_{11} 系数的影响

由图3(a)可知,随着 L_1 从9.4 mm增加到15.4 mm,交趾模块1的长度增加,交趾模块1的串联电感 L_{se1} 与 C_{se1} 随之增加,使得从左到右第二个谐振点(即交趾模块两个谐振点的高频谐振点)降低;由图3(b)可知,随着 L_2 从8.8 mm增加到14.8 mm,交趾模块2的长度增加,交趾模块2的串联电感 L_{se2} 与 C_{se2} 随之增加,使得从左到右第一个谐振点(即

交趾模块两个谐振点的低频谐振点)降低;由图3(c)可知,随着 d 从4.2 mm增加到4.8 mm,两交趾模块的交趾深度均增加,致使 C_{se1} 与 C_{se2} 增加,使得从左到右第一、二个谐振点(即两个交趾模块引起的两个谐振点)均降低。

从左到右第三个谐振点由寄生枝节产生,由图4(a)可知,随着 L_3 从14.8 mm增加到16 mm,寄生枝节长度的增加,使得其引入的电抗增加,从而导致谐振点降低。由图4(b)可知,随着 W_3 从3.6 mm增加到9.6 mm,寄生枝节宽度的增加同样使得其引入的电抗增加,进而导致谐振点降低。

4 实测分析

图5为所设计天线的实物图,它被蚀刻在厚度为1.5 mm的FR4($\epsilon_r = 4.4, \tan \delta = 0.02$)介质基板上,采用共面波导接50 Ω 同轴馈电。辐射单元由两个交趾模块和一对寄生枝节构成。其最终尺寸如表1所示。

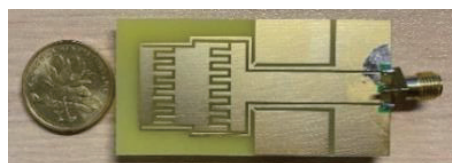


图5 天线实物图

表1 天线结构参数/mm

L	L_1	L_2	L_3	L_T
59.2	13.4	10.8	16.0	30.0
W	W_1	W_2	W_3	h
29.6	21.6	19.0	9.6	1.5

该天线的仿真和实测反射系数如图6所示。由图6可知,该天线的反射系数仿真值与测量值符合较好,测量到的阻抗带宽(-10 dB)为1.33 GHz(1.32 ~ 2.65 GHz),相对带宽67%。仿真和实测结果的些许差异可能由同轴线与共面波导连接处的反射导致。

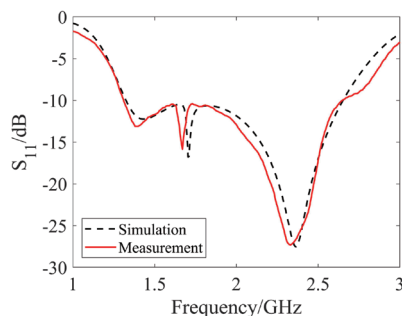


图6 天线仿真和测试的 S_{11} 参数

图7为该天线1.435 GHz、2.365 GHz两个频点的仿真和实测辐射方向图。由图可知,该天线的方向图类似于偶极子天线,极化形式为线极化(沿馈电方向)。该天线的辐射效率如表2所示,该天线的仿真峰值增益为2.84 dBi,实测峰值增益为2.47 dBi,吻合良好。

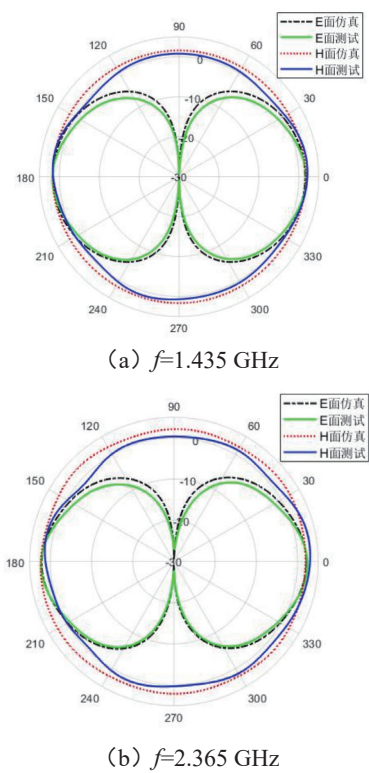


图 7 天线方向图

表 2 天线辐射效率

频点 /GHz	仿真 /%	频点 /GHz	仿真 /%	频点 /GHz	仿真 /%
1.32	95	1.80	97	2.40	98
1.40	97	2.00	99	2.60	95
1.60	98	2.20	99	2.65	93

5 结语

本文设计并验证了一种基于电磁超材料结构的枝节加载微带单极子天线，将超材料与寄生枝节结合，实现了天线的宽带化、小型化和高辐射效率等特性。其辐射单元为两个交趾模块以及一个寄生枝节，最低工作频点对应的电尺寸为 $0.26\lambda_0\times0.13\lambda_0$ 。该天线的宽带和高效率特性，以及其低剖面 and 紧凑性，使得其在现代短程无线通信系统中具有潜在的应用价值。

参考文献：

[1]ZHOU C, WANG G, LIANG J, et al. Broadband antenna employing simplified MTLs for WLAN/WiMAX applications[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2014,13:595-598.

[2] 陈建锋,程强. 基于超材料的导波结构和天线综述 [J]. 无线电工程,2022,52(2):192-199.

[3]ELEFTHERIADES G V, IYER A K, KREMER P C. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded

transmission lines[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2002, 50(12): 2702-2712.

[4]ZHU J, ELEFTHERIADES G V. A compact trans-mission-line meta-material antenna with extended bandwidth[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2009,8:295-298.

[5]JI J K, KIM G H, SEONG W M. Bandwidth enhancement of metamaterial antennas based on composite right/left-handed transmission line[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2010,9:36-39.

[6]LIU L Y, WANG B Z. A broadband and electrically small planar monopole employing meta-material transmission line[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2015, 14: 1018-1021.

[7]HUNG C, CHIU T. Dual-band reconfigurable antenna design using slot-line with branch edge[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015,63(2):508-516.

[8]WU R, CHU Q X. Stub-loaded broadband dual-polarized antenna for 2G/3G/LTE base stations[C]//2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP).Piscataway:IEEE, 2016:398-399.

[9]ZHOU J, WU X, YOU B, et al. A band-notched UWB antenna loaded with tree-shaped fractal[C]// 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama).Piscataway:IEEE, 2018:2333-2339.

[10]YANG X, FENG Q, TIAN D, et al. A wide-band dual circular polarization UHF RFID reader antenna based on miniaturized branch line coupler[C]// 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama).Piscataway:IEEE,2018: 1290-1294.

[11]CALOZ C, ITOH T. Electromagnetic metama-terials: trans-mission line theory and microwave applications[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2006.

[12]LAI A, LEONG K, ITOH T. Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation pattern based on periodic structures[J].IEEE transactions on antennas and propagation, 2007,55(3):868-876.

[13] 徐亚维, 许婷, 张迪雅, 等. X波段混压印制板微带线阻抗匹配的研究 [J]. 长江信息通信,2023,36(9):106-108.

【作者简介】

周仕彬（1997—），男，四川巴中人，硕士研究生，研究方向：天线设计。

陈星（1970—），男，四川巴中人，教授，博士生导师，研究方向：天线设计、电磁场与微波技术、并行计算等。

（收稿日期：2024-01-15）