



低剖面紧凑的圆盘加载单极子天线

摘要

本文介绍了一种低剖面小型化圆盘加载单极子天线.通过盘加载的方式,在中心频率 5.8 GHz 处,首先将单极子天线的剖面从大约 12.9 mm($0.25\lambda_0$)降低到 2 mm($0.039\lambda_0$),实现了低剖面的特性.加载在单极子天线上方的圆盘,尺寸大概为 21 mm($0.41\lambda_0$),因此天线具有结构紧凑的特点.接着,为了使天线具有良好的匹配,在加载圆盘四周加入 4 个接地通孔,并且在馈电端口加入集总电感.最终,天线在中心工作频率 5.8 GHz 处实现了反射系数-15 dB 的匹配性能.

关键词

紧凑;低剖面;圆盘加载单极子天线;阻抗匹配;圆锥形波束

中图分类号 TN823

文献标志码 A

0 引言

为了使位于地板上的天线发射出的信号能够有效覆盖水平全向区域,使用具有全向性圆锥形波束的天线,是 5G 室内通信系统的重要要求之一^[1].单极子天线具有结构简单和易加工的优点,是实现圆锥形方向图很好的选择,但是,传统的单极子天线为了达到谐振要求,高度大约需要 $0.25\lambda_0$ ^[2].

为了降低单极子天线的高度,同时保证天线结构紧凑,不少学者对单极子天线的设计进行了深入的研究.其中,文献[3-4]研究表明,单极子上方加载圆盘结构后,可以保证在中心频点谐振的情况下,有效降低天线高度.文献[5-6]提出,对于圆盘加载单极子天线,当在圆盘的四周加入接地的短路探针之后,可以进一步改善天线的匹配.

基于已有的设计方法,再结合匹配电路的方式,本文提出了一个高度更低、结构紧凑的圆盘加载单极子天线.天线通过结合圆盘加载、短路探针和匹配电路 3 种方式,在 5.8 GHz 的工作频点处实现了高度仅为 $0.039\lambda_0$ 的结构,同时具有圆锥形的方向图.通过对天线结构进行优化,在中心频率 5.8 GHz 处天线获得了良好的匹配.

1 天线设计

如图 1a,单极子天线可由一根立在金属地板上的金属杆构成,它具有结构简单和易加工的优点.但是图 1a 的单极子天线高度较高,使用该类型天线后,会导致通信设备不易实现小型化.因此,为了实现低剖面紧凑结构的单极子天线,本文采用了如下匹配方法:

首先,通过在单极子上方加载盘形结构,在保持天线结构紧凑简单的前提下,将天线的高度显著降低,得到如图 1b 所示天线.但是,当天线高度降低后,天线的辐射口面相应变小,辐射能力变差,因此,天线更加不容易匹配.天线 b 的史密斯圆如图 2 所示,对应中心频率 5.8 GHz 的点 1 在史密斯圆图的右上方边缘.

然后,根据文献[5-6]提出的方式,通过在天线上方的圆盘边缘加载结构,添加接地的短路探针,可以对天线的匹配进行改善.添加接地短路探针的圆盘加载单极子天线为天线 c,其结构如图 1c 所示.对于天线上方圆盘形边缘的短路探针,与天线 b 相比,从端口处观察,相当于天线多加了一段传输线,然后再并联一个电感.天线 c 的史密斯圆如图 2 所示,对应中心频率 5.8 GHz 的点 2.相比天线 b 的点 1,点 2

收稿日期 2018-11-29

资助项目 国家自然科学基金(61525104)

作者简介

侯岳峰,男,博士生,研究方向为端射阵天线、超薄三维移相单元. houyf15@mails.tsinghua.edu.cn

张志军(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为移动终端天线、有源天线、可重构天线、智能天线及阵列天线. zjzh@tsinghua.edu.cn

1 清华大学 电子系,北京,100084

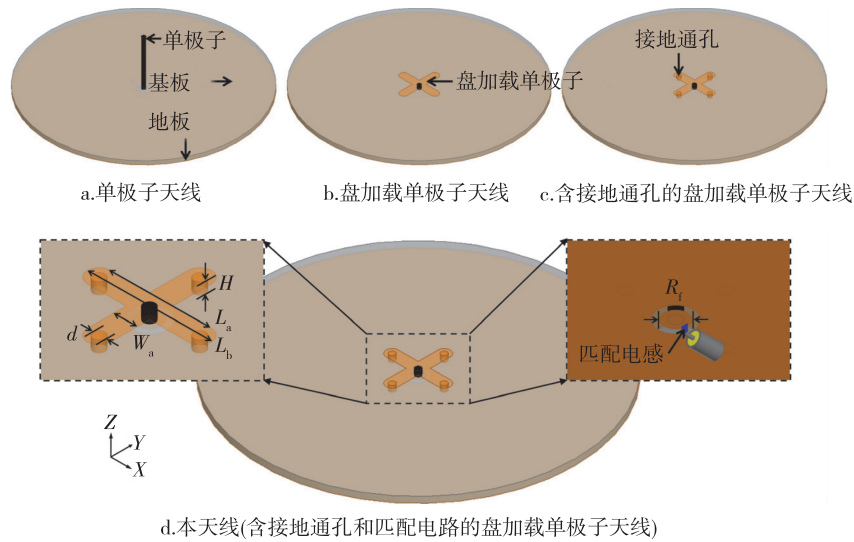


图1 天线结构的演化

Fig.1 Evolvement of the proposed antenna:(a) monopole antenna;(b) top-hat monopole antenna;(c) shorted top-hat monopole antenna;(d) the proposed antenna (shorted top-hat monopole antenna with matching circuit)

更加靠近史密斯圆图的中心,说明天线的匹配变好.

最终,为了使天线在中心频率 5.8 GHz 处能够匹配,在天线的馈电端口处加载匹配电路^[7-8].由于天线 b 在史密斯圆图的位置在右上角,因此,可以通过加载串联电感的方式,使点 2 沿阻抗圆图顺时针旋转到点 c,得到天线 d,其结构如图 1d 所示.在馈电端口加载用于匹配的串联电感后,天线 d 的史密斯圆图如图 2 所示,对应中心频率 5.8 GHz 的点 3 已经十分靠近史密斯圆图的中心位置.由此,天线在中心频率处实现了良好的匹配.

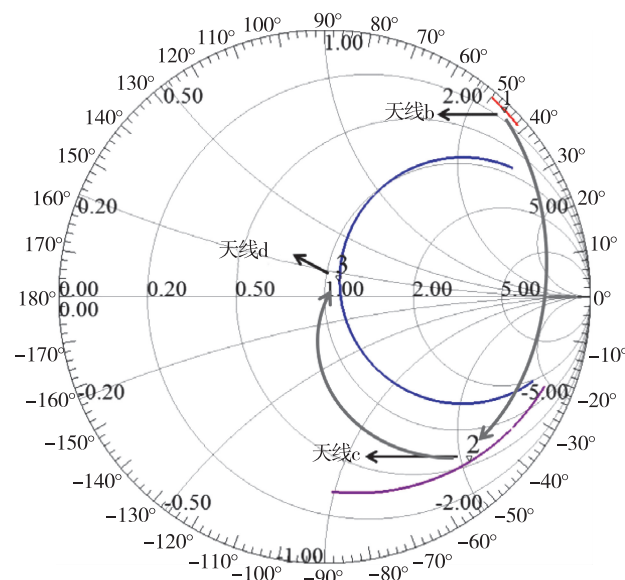


图2 天线的匹配方式和阻抗轨迹

Fig.2 The matching method and the impedance locus

天线 d 是最终设计的天线结构,细节如图 1d.天线设计在一个半径 R_g 为 52 mm、厚度 H 为 2 mm 的圆形基板上.基板材质为 FR4,介电常数为 4.4,介质损耗为 0.02.基板为双面板,上表面为天线的圆盘形结构,下表面为地板和馈电结构.使用同轴线在地板下表面为天线馈电.同轴线外导体与天线地板相连接,同轴线内导体与匹配电感的一端连接,匹配电感的另一端与天线中心探针相连接.由此,相当于在馈电端口串联了一个匹配电感.为满足加工要求,在下表面,中心探针与半径 R_l 为 4 mm 的圆盘相连,圆盘与地板之间存在宽度为 1 mm 的缝隙.中心探针与 4 个圆盘边缘的短路探针的直径 d 均为 2 mm.圆盘上相对的 2 个短路探针中心之间的距离 L_a 为 17.2 mm.为了满足加工要求,圆盘边缘与短路探针边缘距离为 1 mm,圆盘长度 L_b 为 21.2 mm.

2 参数对天线性能的影响

当天线的高度固定后,可以调节天线性能的重要参数,包含了相对的 2 个短路探针中心之间的距离 L_a 和串联在馈电端口的匹配电感值 I_{nd} .当不含串联在馈电端口的匹配电感时,即天线为图 1c 中的天线 c.如图 3a,当 2 个短路探针中心之间的距离逐渐变长,对应中心频率 5.8 GHz 的点在史密斯圆图上顺时针旋转,并逐渐向史密斯圆图的中心靠近.虽然史密斯圆图越靠近中心,越容易使用匹配电路进行匹配,但是天线的尺寸将变得较大,不再具有紧凑的

特性.因此,本文中的天线,相对的2个短路探针中心之间的距离 L_a 选择为 17.2 mm.当加入串联在馈电端口的匹配电感时,即天线为图 1d 中的天线 d.如图 3b 所示,当电感值逐渐变大时,对应中心频率 5.8 GHz 的点在史密斯圆图上沿着阻抗圆顺时针向上旋转.在图 3b 中可以看到,不同的电感值对应的频率曲线上与史密斯圆图最近的点,对应的频点不同.由于本文设计的天线工作在 5.8 GHz,因此,电感值 I_{nd} 选择为 4.7 nH.

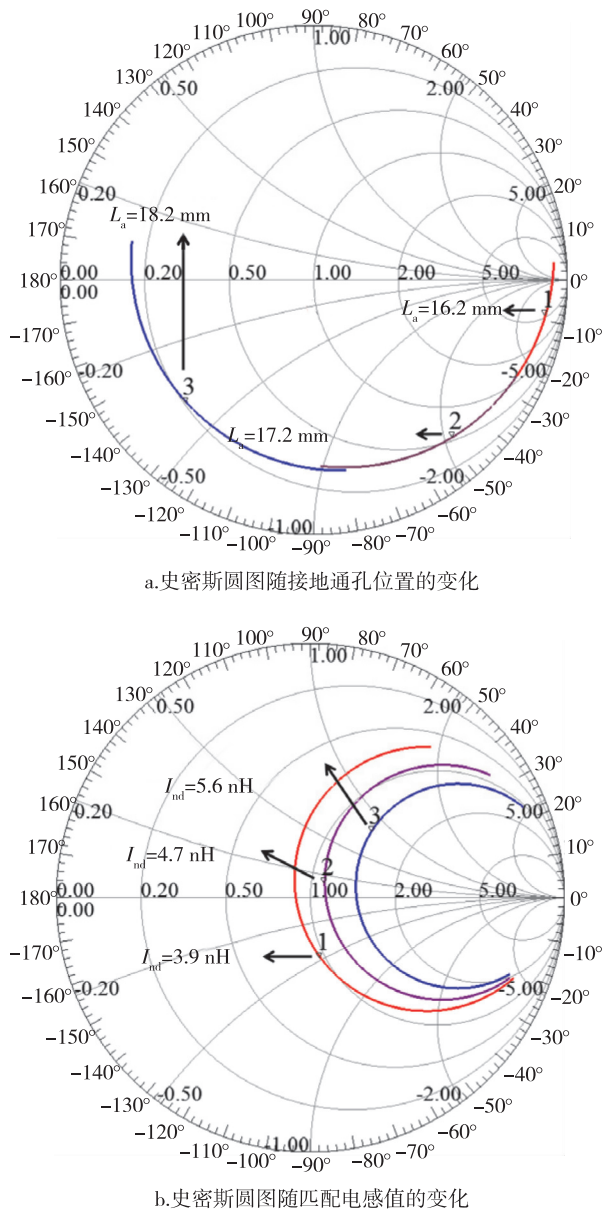


图3 天线参数对史密斯圆图的影响

Fig. 3 The influence of the parameters on the performance of the smith chart: (a) the distance L_a between the two short holes; (b) the value I_{nd} of the inductance on the feeding port

如图 4 所示,受到地板边缘的影响,地板半径尺寸不同时,本天线上半空间的方向图会发生变化.在中心频率 5.8 GHz 处,当地板半径为 0.5 倍波长时,波束增益最大的方向在 $\theta = 39^\circ$ 处.在方向图 $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 90^\circ$ 处的位置,相方向图最大增益的位置,增益减小了大概 9 dB.当地板半径为 5 倍波长时,波束增益最大的方向在 $\theta = 67^\circ$ 处.在方向图 $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 90^\circ$ 处的位置,相方向图最大增益的位置,增益减小了大概 4.5 dB.当地板半径为无穷大时,波束增益最大的方向在 $\theta = 90^\circ$ 处.因此,由图 4 可知,当天线的地板尺寸越大,天线上半空间的方向图上翘的角度越小,在水平方向的增益越高.

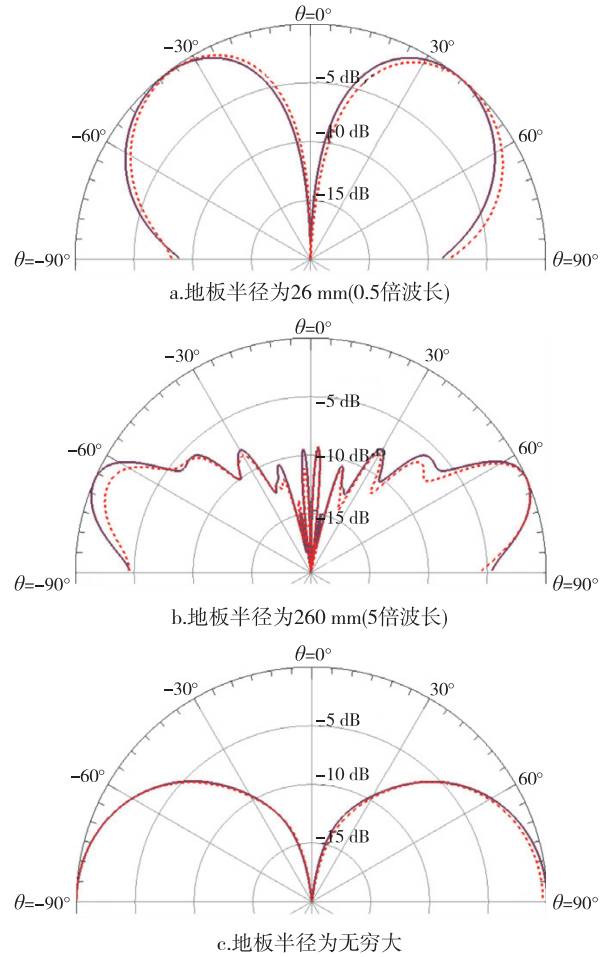


图4 地板尺寸对天线方向图的影响
(紫色实线为 $\varphi = 0^\circ$, 红色虚线为 $\varphi = 90^\circ$)

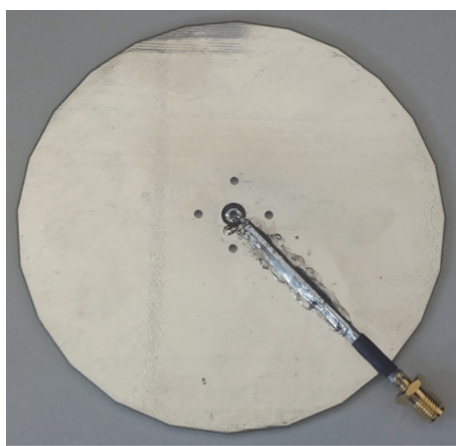
Fig. 4 The influence of the ground plane dimension on the radiation pattern of the proposed antenna (the purple solid line is corresponding to the radiation pattern on the plane $\varphi = 0^\circ$, the red dash line is corresponding to the radiation pattern on the plane $\varphi = 90^\circ$): (a) $R_g = 26$ mm ($0.5\lambda_0$ at 5.8 GHz); (b) $R_g = 260$ mm ($5\lambda_0$ at 5.8 GHz); (c) $R_g = \infty$

3 天线的测试结果

天线的加工样品如图 5 所示.实际加工的样品的尺寸与图 1b 中标的结构尺寸相同.天线仿真与测试的反射系数如图 6 所示.在中心频点 5.8 GHz 处,天线具有良好的匹配.在中心频率 5.8 GHz 处,仿真的反射系数大约为-24 dB.反射系数小于-10 dB 的带宽范围为 5.76~5.84 GHz(80 MHz).在中心频率 5.8 GHz 处,测试的反射系数大约为-15 dB.反射系数小于-10 dB 的带宽范围为 5.77~5.84 GHz(70 MHz).



a.天线正面



b.天线反面

图 5 天线实物

Fig. 5 Fabricated prototype of the proposed antenna

图 7 为本天线在中心频率 5.8 GHz 处仿真和测试的上半空间归一化方向图.在方向图的 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 两个面上,天线均具有圆锥形方向图的特性.方向图在最上方($\theta = 0^\circ$)为零点.由于地板边缘的影响,方向图增益最大值的位置不在 $\theta = 90^\circ$ 处,方向图形状存在一定的上翘.仿真的方向图增益最大值在 $\theta = 56^\circ$ 处,半波束宽度为 37° ,增益为-2.55 dBi.测试

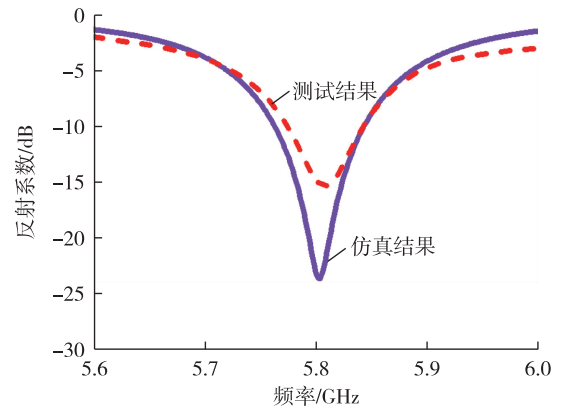


图 6 反射系数

Fig. 6 Reflection coefficient of the proposed antenna

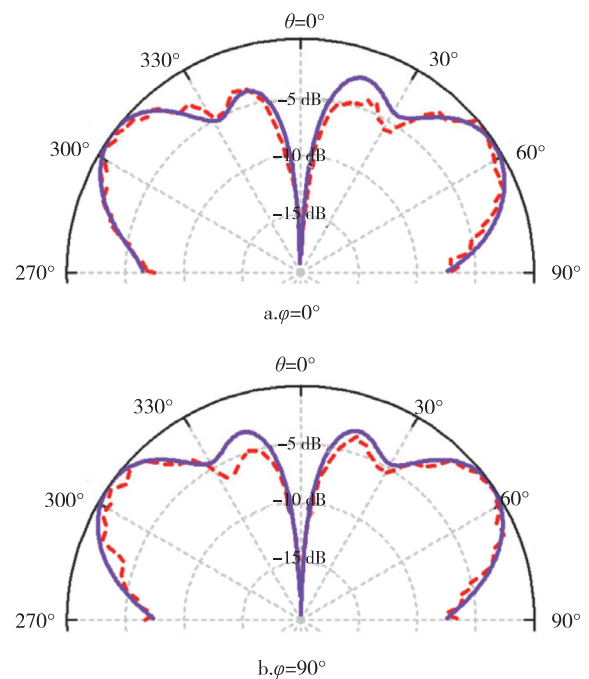


图 7 上半空间归一化方向图

(紫色实线为仿真结果,红色虚线为测试结果)

Fig. 7 Upper-hemisphere normalized radiation pattern of the proposed antenna (the purple solid line is corresponding to the simulated result, the red dash line is corresponding to the measured result)

的方向图增益最大值在 $\theta = 57^\circ$ 处,半波束宽度为 37° ,增益为-3.14 dBi.

从图 6 和图 7 可以看到,仿真和测试结果存在一定的差异,但是,两者吻合依然较好.仿真和测试结果之间的差异,主要是由于加工误差和装配误差导致的.

表 1 为本天线与文献中已有的低剖面结构紧凑

的单极子天线之间关于尺寸的对比.从表 1 中可以看到,本天线与已有文献的天线相比,高度更低,且结构保持紧凑.

表 1 引文中和本天线关于尺寸的对比

Table 1 Comparison of dimensions between the antennas in the open literature and the proposed antenna

文献	频率/GHz	介电常数	圆盘尺寸/ λ_0	高度/ λ_0
[3]	10.00	1.0	1.220	0.100
[4]	1.50	2.2	0.438	0.047
[5]	0.80	1.0	0.324	0.068
[6]	0.77	2.6	0.267	0.064
本文	5.80	4.4	0.410	0.039

4 结束语

本文通过在单极子天线上方加载圆盘形结构、在盘形结构边缘添加接地的金属通孔,以及在馈电端口添加匹配电路的方式,实现了一个低剖面结构紧凑的单极子天线.该单极子天线在中心频点 5.8 GHz 处具有良好的匹配和圆锥形方向图.该天线在第五代通信系统中有潜在的重要应用.

A low-profile compact top-hat monopole antenna

HOU Yuefeng¹ ZHANG Zhijun¹

¹ Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract In this study, a compact, low-profile, top-hat monopole antenna is proposed. By designing a top hat for a monopole, the antenna profile reduces from 12.9 mm ($0.25\lambda_0$) to 2 mm ($0.039\lambda_0$) at a center frequency of 5.8 GHz, which helps realize a low-profile antenna structure. The length of this top hat is 21 mm ($0.41\lambda_0$); therefore, the proposed antenna is compact. To match the proposed antenna around the center frequency, four metal holes connecting with the ground are added on the side of the top hat, and a lumped inductance element is added to the feeding port. Finally, a simple prototype is realized, which exhibits good matching around the center frequency of 5.8 GHz.

Key words compact; low profile; top-hat monopole antenna; impedance matching; conical beam

参考文献

References

- [1] Fan K K, Hao Z C, Yuan Q, et al. Wideband horizontally polarized omnidirectional antenna with a conical beam for millimeter-wave applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(9): 4437-4448
- [2] Hou Y F, Li Y, Zhang Z J, et al. Narrow-width periodic leaky-wave antenna array for endfire radiation based on Hansen-Woodyard condition [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 6393-6396
- [3] Shen Z X, Wang J P. Top-hat monopole antenna for conical-beam radiation [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 396-398
- [4] Hu Z X, Shen Z X, Wu W, et al. Low-profile log-periodic monopole array [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(12): 5484-5491
- [5] Aten D W, Haupt R L. A wideband, low profile, shorted top hat monocone antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(10): 4485-4491
- [6] Nguyen-Trong N, Pinapati S P, Hall D, et al. Ultralow-profile and flush-mounted monopolar antennas integrated into a metallic cavity [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(1): 86-89
- [7] Wang H, Zhang Z J, Li Y, et al. A dual-resonant shorted patch antenna for wearable application in 430 MHz band [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(12): 6195-6200
- [8] Zhang Z J. *Antenna design for mobile devices* [M]. Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2011. DOI: 10.1002/9780470824481