

一种小型的具有良好陷波特性的超宽带缝隙天线

叶亮华, 褚庆昕

(华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640)

摘 要: 为了有效地抑制超宽带通信系统与窄带通信系统之间潜在的干扰, 提出了一种小型的带组合陷波结构的缝隙超宽带天线. 该天线采用印刷电路板上的多边形缝隙作为辐射单元, 由背面的 T 形微带线馈电, 天线的总尺寸仅为 $16\text{mm} \times 25\text{mm} \times 0.8\text{mm}$. 通过 T 形微带上开的一 C 形槽和地板上开的一矩形槽的组合陷波结构, 产生阻带特性且阻带陡度更陡峭、带宽更宽, 实现了良好的陷波功能. 仿真和测试的结果表明, 天线在超宽带系统 $3.1\text{GHz} \sim 10.6\text{GHz}$ 工作频段内的电压驻波比小于 2, 在 $5 \sim 6\text{GHz}$ 频率范围实现了良好的滤波特性, 有效地阻隔了无线局域网系统对超宽带系统的影响. 同时该天线在整个工作频段具有良好的全向辐射方向特性和稳定的增益.

关键词: 超宽带天线; 陷波特性; 缝隙天线; 小型天线

中图分类号: TN822 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2862-05

Improved Notch-Band Slot UWB Antenna with Small Size

YE Liang-hua, CHU Qing-xin

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: In order to minimize the potential interferences between the ultra-wideband systems and the narrowband communication systems effectively, a compact slot ultra-wideband antenna with assembled band notched structure is presented. A polygon slot on a printed circuit board is taken as the radiating element and is fed by a T-shaped stub. The overall size of the antenna is as small as $16\text{mm} \times 25\text{mm} \times 0.8\text{mm}$. The assembled band-notch structure formed by a C-shaped slit in the T-shaped stub and a rectangular slit embedded in the ground plane is implemented to shape a much sharper, wider, and deeper notch-band. Simulated and measured results indicate that the proposed antenna yields an voltage standing wave ratio (VSWR) of less than 2 in the impedance bandwidth range of 3.1 to 10.6 GHz, except the bandwidth of 5.0 ~ 6.0 GHz for band notch. Thus, the negative effect of WLAN on ultra-wideband system is eliminated effectively. Omnidirectional radiation pattern and stable gain are obtained in the whole bandwidth range.

Key words: ultra-wideband antenna; notched characteristics; slot antenna; small antenna

1 引言

自从美国联邦通信委员会(FCC)于 2002 年将 $3.1 \sim 10.6\text{GHz}$ 频段划归为超宽带(UWB)的民用使用频段^[1]后, UWB 系统的设计和应用就引起了研究人员的广泛关注^[2~4]. 超宽带天线作为超宽带系统的重要组成部分, 成为近年来研究的热点. 超宽带天线的主要设计要求包括在超宽频段($3.1 \sim 10.6\text{GHz}$)内阻抗匹配、具有良好的全向辐射方向特性和稳定的增益, 并要求天线小型化以及制造成本低. 以往很多超宽带天线的尺寸往往较大, 难以实现与小型 UWB 系统的集成, 因此, 小型超宽带天线成为近年来实验研究的一大热点^[5].

超宽带系统的通信频段内覆盖了 $5.150 \sim 5.825\text{GHz}$

的无线局域网(WLAN)窄带系统频段, 为了抑制超宽带系统与窄带系统间潜在的干扰, 通常需要在超宽带系统内加入带阻滤波器滤除窄频带, 但这不仅增大系统的复杂度, 同时还增加了成本. 一种简单而有效的方法就是在超宽带天线中引入陷波结构, 使天线能在 WLAN 窄带系统的频段内呈现较大的反射系数, 实现滤波功能^[6~9].

由于宽缝隙天线具有阻抗带宽宽、结构简单、易加工、成本低和易与其他微波电路相集成等特性, 研究人员广泛应用宽缝隙天线来设计 UWB 天线^[10~14]. 文献[10]中提出了一种矩形缝隙超宽带天线, 利用宽缝隙天线的多频谐振特性, 能产生超宽带特性, 但该天线的尺寸较大, 同时也没有引入陷波结构, 不具备滤波功能. 文

献[11]中提出了一种带陷波结构的 T 形微带馈电缝隙超宽带天线,文中提出了三种单陷波结构,即 T 形馈电微带上开一半波长的细槽、开一对 $1/4$ 波长的细槽,或在矩形缝隙中加了一对半波长的微带枝节,这些单陷波结构都能产生滤波功能.此外,在圆形缝隙上嵌入一圆弧形微带枝节[12],也能实现超宽带天线的滤波特性.但是,上面所述的陷波结构只能产生单个滤波频率点,阻带的陡度不陡峭且带宽较窄,使得天线的滤波效果较差,不能有效地消除 UWB 系统与其他窄带系统之间潜在的干扰.与此同时,上述缝隙超宽带天线[10~12]的尺寸较大,难以实现与小型超宽带系统的集成.

为此,本文提出了一种具有良好陷波特性的带组合陷波结构的多边形缝隙超宽带天线.通过引入多边形缝隙作为天线的辐射单元,可以更好地实现阻抗匹配,减小天线的尺寸,天线的总尺寸仅为 $16 \times 25 \times 0.8\text{mm}$,比大部分缝隙超宽带天线[10~14]的尺寸都小. T 形微带馈线上开的一 C 形细缝与地板上开的一矩形细缝的组合陷波结构,能在阻带内产生两个滤波频率,这两个滤波频率耦合在一起使阻带陡度更陡峭且带宽更宽,从而实现良好的陷波功能.通过调整 T 形微带上的 C 形细缝和地板上矩形细缝的长度,可以改变天线的陷波频率.实验结果表明,文中提出的天线在 $3.1 \sim 10.6\text{GHz}$ 工作频段内的电压驻波比小于 2,在 $5 \sim 6\text{GHz}$ 阻带频率范围内实现了良好的滤波特性,有效地阻隔了无线局域网系统对超宽带系统的影响.同时,该天线在整个工作频段具有良好的全向辐射方向特性和稳定的增益,因此,该天线是一种具有良好使用价值的超宽带天线.

2 多边形缝隙超宽带天线的设计

多边形缝隙超宽带天线的结构和尺寸如图 1 所示,该天线印制在一块厚度为 0.8mm 、相对介电常数为 2.55 的 Neltec NY9255 印刷电路基板上.天线由雕刻在地板上的多边形缝隙和背面 T 形微带馈线组合而成,多边形缝隙和 T 形微带都采用了渐变结构,结构渐变性能使得天线从一个频率谐振模式平缓地过渡到另一个频率谐振模式,确保了在较宽的频带内获得良好的阻抗匹配[6~7].天线利用宽缝隙天线的多谐振特性产生超宽带工作频段;多边形缝隙具有较多的设计尺寸参数,与矩形、圆形或椭圆缝隙 UWB 天线相比,多边形缝隙 UWB 天线可调的尺寸参数更多,更容易实现阻抗匹配.

作为谐振型天线,可以通过调整多边形缝隙的尺寸参数来控制天线的最低谐振频率.多边形缝隙天线的最低谐振频率 f 可以通过下面的等式得到:

$$f = \frac{c}{L \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (1)$$

其中 L 为多边形缝隙的周长, c 为光速, ϵ_{eff} 为相对介电常数.根据上面的阐述,这种缝隙超宽带天线的设计步骤可以概括为如下所述.首先确定 T 形微带馈线的宽度,使馈电微带的特征阻抗约为 50Ω ;然后根据等式 (1) 确定多边形缝隙的初始尺寸,使其在低频 ($3 \sim 4\text{GHz}$) 辐射产生谐振频率;最后优化多边形缝隙和 T 形微带枝节的设计参数,使天线在 $3.1 \sim 10.6\text{GHz}$ 频段内具有良好的阻抗匹配,满足设计要求.

根据上面所阐述的设计步骤,我们应用电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对天线进行初始化设计,获得天线的尺寸参数如图 1 所示,天线的总尺寸为 $16 \times 25 \times 0.8\text{mm}$,具有较小的体积和较低的剖面尺寸,有利于实现与小型超宽带系统的集成化设计.在天线的设计过程中,如果知道了天线的尺寸参数的变化对天线性能的影响规律,那么我们就可以快速有效地完成天线的设计.从上面的分析中可以看出多边形缝隙的设计参数对天线的性能影响较大,因此我们研究了缝隙尺寸的变化对天线输入阻抗匹配的影响.图 2(a)所示的是天线的阻抗匹配随着参数 L_1 、 W_1

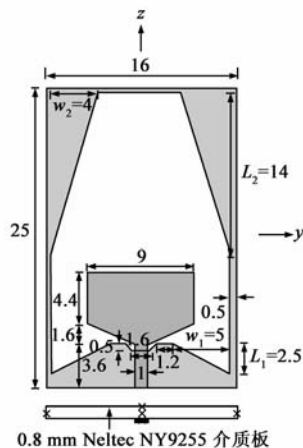


图1 缝隙超宽带天线

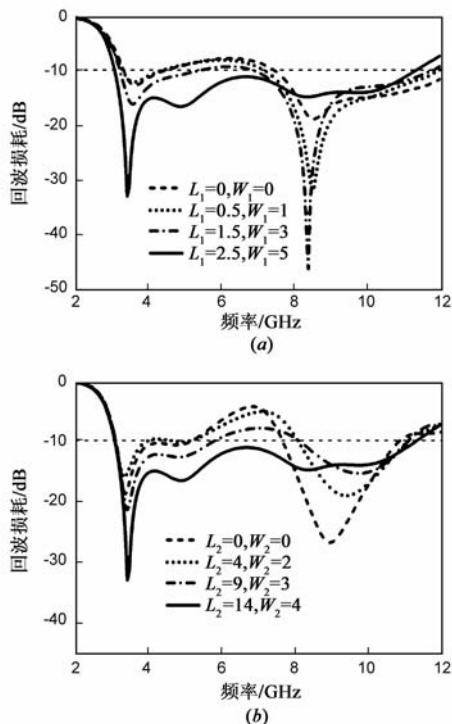


图2 缝隙尺寸变化对天线回波损耗的影响

的频率变化曲线,其他的参数与图 1 相同.从图 2(a)中可以看出,随着 L_1 、 W_1 的增大,天线在 3.1~10.6GHz 频段实现了更好的阻抗匹配;同样,随着 L_2 、 W_2 的增大,可以改善天线在超宽带频带 3.1~10.6GHz 的阻抗匹配,如图 2(b)所示.从上面的分析可见,缝隙的渐变结构有利于改善天线在整个超宽带频带内的阻抗匹配.

3 陷波超宽带天线的设计

上面所述的缝隙超宽带天线没有引入陷波结构,不具备滤波功能,不能消除超宽带系统与窄带系统之间潜在的干扰.文献[11,12]中提出了多种带陷波结构的缝隙超宽带天线,但这些天线只能产生单个滤波频率点,阻带的陡度不陡峭且带宽较窄,滤波效果较差.为了改善天线的滤波性能,本文提出了一种带组合陷波结构的缝隙超宽带天线,如图 3 所示(陷波结构以外的尺寸与图 1 相同).

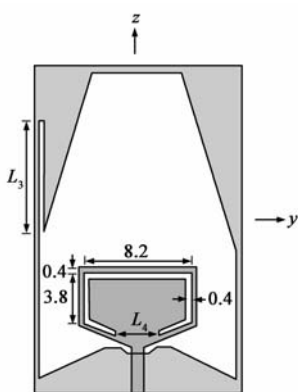


图3 带组合陷波结构缝隙超宽带天线的结构

缝组成天线的陷波结构,其中 C 形细缝和矩形细缝谐振产生的带阻频率(f_1 、 f_2)分别由它们的总长度决定:

$$f_1 = \frac{c}{2L_{11}\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2)$$

$$f_2 = \frac{c}{4L_{22}\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (3)$$

其中 L_{11} 、 L_{22} 分别为 C 形细缝和矩形细缝的总长度, c 为光速, ϵ_{re} 为相对介电常数. 根据等式(2)和(3)可以得出,当 f_1 与 f_2 的数值相差较大时,天线能形成两个阻带,实现双陷波特性和;当 f_1 与 f_2 的数值相差不大且耦合在一起时,相当于一个二阶的带阻滤波器,使阻带陡度更陡峭且带宽更宽,从而实现了良好陷波功能.

我们研究了几种总长度不同的 C 形缝隙与矩形缝隙的组合陷波结构对天线性能的影响,如图 4 所示.从图中可见,随着陷波结构总长度的减小,阻带频率向高处平移,这与等式(2)和(3)表达一致;从图中还可以看出,C 形缝隙与矩形缝隙产生的阻带频率耦合在一起,阻带的陡度更陡峭,天线的阻带在这三种情况下都有良好的滤波特性.为了比较带各陷波结构的缝隙超宽带天线的阻带特性,本文研究了各种陷波结构缝隙超宽带天线的阻抗匹配,如图 5 所示.从图中可见,组合陷波结构缝隙 UWB 天线的阻带比各单陷波结构缝隙 UWB 天线更陡峭,即组合陷波结构缝隙 UWB 天线的滤波效果更好.

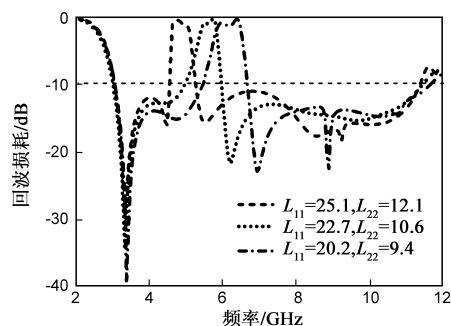


图4 不同长度的陷波结构对天线回波损耗的影响

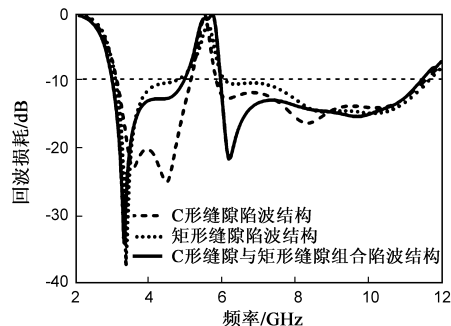


图5 各陷波结构天线的回波损耗, $L_3=10.6$ mm, $L_4=2.5$ mm, 其他尺寸与图3相同

通过电磁仿真软件 Ansoft HFSS 仿真,图 6 给出了缝隙 UWB 天线的电流分布情况,在通带 4GHz 和 7GHz 处,电流主要聚集在倒 C 形缝隙边缘, C 形缝隙和矩形缝隙附近的电流很小;而在阻带谐振频率 5.42GHz 和 5.75GHz 处,电流分别集中在 C 形缝隙和矩形缝隙上,倒 C 形缝隙上的电流很小,造成天线输入阻抗异常,天线在这两频率点附近产生较大的衰减和阻抗失配,形成陷波.

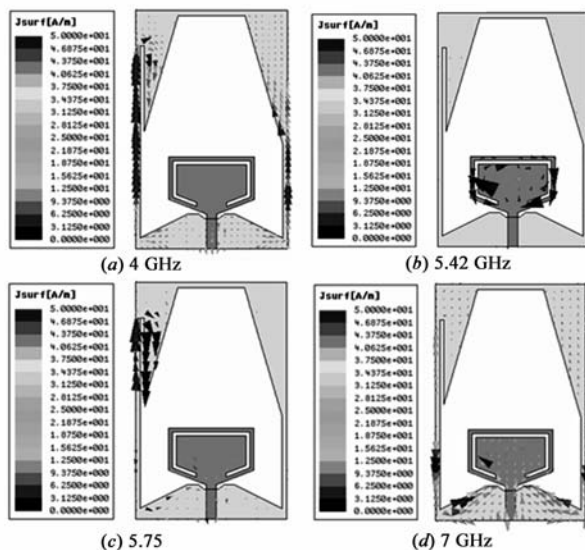


图6 阻带缝隙UWB天线电流分布

4 实验结果

基于图 3 ($L_3 = 10.6$ mm, $L_4 = 2.5$ mm) 给出的带组合陷波结构多边形缝隙天线的尺寸,我们制作了天线的

样品,并使用了 AgilentN5230A (10MHz ~ 50GHz)矢量网络分析仪对天线进行了测量.天线仿真和测试的回波损耗如图 7 所示,从图中可以看出,天线在 5.03GHz ~ 6.06GHz 频段的阻抗失配,在其余的 UWB 通信频段具有良好的阻抗匹配,表明天线在 5GHz ~ 6GHz 频段内具有良好的滤波功能.天线回波损耗的测量结果和仿真结果基本吻合,两者存在的偏差主要是由同轴接头的焊接、天线尺寸的加工误差等因素造成的.各陷波结构的缝隙 UWB 天线的电压驻波比如图 8 所示,从图中可见,组合陷波结构天线的阻带的陡度和带宽比单陷波结构的天线要大,由此可见本文提出的带组合陷波结构的缝隙天线比单陷波结构的 UWB 天线具有更好的滤波特性.

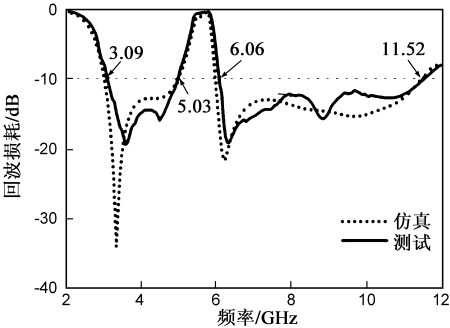


图7 天线回波损耗

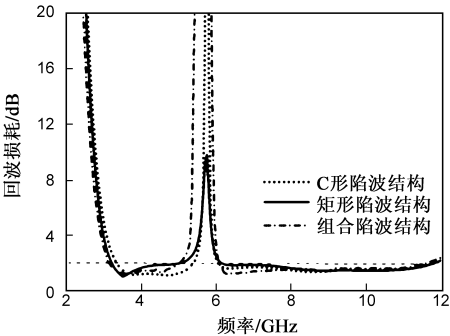


图8 各陷波天线电压驻波比

图 9 给出了在 3.5GHz、6.5GHz 和 9.5GHz 频率点上的 E 面(xz 平面)和 H 面(xy 平面)的辐射方向图.在 H 面,天线辐射方向图不圆度最大仅为 7.9dB,具有比较好的全向性,可收发各个方向的信号;在 E 面,天线方

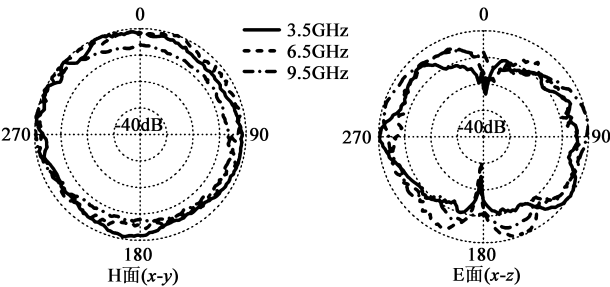


图9 陷波天线辐射方向图

向图呈哑铃型,类似于偶极子天线的双向方向图.天线的增益如图 10 所示,天线在整个工作频段内具有比较平坦的增益特性,天线增益大约为 3.5 ~ 5.6dBi.在 5.4GHz 和 5.7GHz 频率点附近,天线的增益显著下降至 -4.5dBi 左右,抑制了 WLAN 窄带系统的干扰.

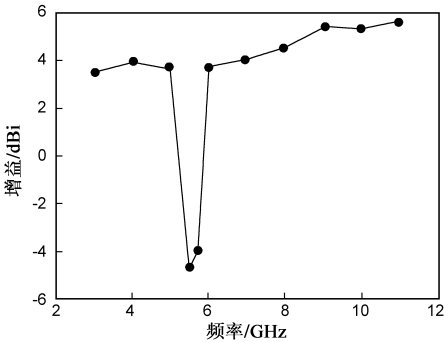


图10 天线增益

5 结论

本文提出了一种应用于超宽带系统的带组合陷波结构微带馈电多边形缝隙超宽带天线.通过引入组合陷波结构,阻带的陡度和带宽更大,使天线在 5GHz ~ 6GHz 频段内具有良好的陷波特性和有效地抑制了 WLAN 窄带系统对超宽带系统的干扰.该天线的结构简单、制造容易,成本低,而且这种天线具有较小的体积和较低的剖面尺寸,有利于实现与前端电路的集成化设计.同时该天线具有比较好的辐射方向特性,是一种性能较好、具有实用价值、能广泛应用于超宽带系统中的超宽带天线.

参考文献:

[1] Federal Communications Commission. First report and order [B/OL]. http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-05-153A1.pdf, 2005-09-23.

[2] 刘培国,刘克成,等.一种新型超宽带平面天线的 FDTD 分析[J].电子学报,2000,28(6):86-88.

LIU Pei-guo LIU Ke-cheng, et al. FDTD analysis of an ultra-wide band planar antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28 (6): 86-88. (in Chinese)

[3] 张文梅,陈雪,等.平面超宽带天线的设计与研究[J].电波科学学报,2008,23(2):335-339.

ZHANG Wen-mei, CHEN Xue, et al. Design of planar UWB antennas [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 335-339. (in Chinese)

[4] 程勇,吕文俊,等.一种小型平面超宽带天线的设计与研究[J].电波科学学报,2006,21(4):582-585.

CHENG Yong, LÜ Wen-jun, et al. Design and analysis of a compact planar ultra-wideband antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(4): 582-585. (in Chinese)

- [5] Z A Zheng, Q X Chu. CPW-fed ultra-wideband antenna with compact size [J]. *Electron Lett*, 2009, 45(12): 593 – 594.
- [6] Q X Chu, Y Y Yang. A compact ultrawideband antenna with 3.4/5.5 GHz dual band-notched characteristics [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2008, 56(12): 3637 – 3644.
- [7] 褚庆昕, 杨颖颖. 一种小型平面陷波超宽带天线 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(9): 77 – 80.
CHU Qing-xin, YANG Ying-ying. A compact planar ultra-wideband antenna with notch characteristics [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 36(9): 77 – 80. (in Chinese)
- [8] 周海进, 孙保华, 等. 具有双陷波特性的超宽带天线设计与研究 [J]. *微波学报*, 2009, 25(3): 13 – 17.
ZHOU Hai-jin, SUN Bao-hua, et al. Design and analysis of a planar ultra-wideband antenna with dual band-notched characteristics [J]. *Journal of Microwaves*, 2009, 25(3): 13 – 17. (in Chinese)
- [9] 程勇, 吕文俊, 等. 一种小型陷波多用途超宽带天线 [J]. *微波学报*, 2007, 23(1): 20 – 24.
CHENG Yong, LÜ Wen-jun, et al. A compact frequency notched ultra-wideband antenna for multiple application [J]. *Journal of Microwaves*, 2007, 23(1): 20 – 24. (in Chinese)
- [10] D D Krishna, M Gopikrishna, et al. Ultra-wideband slot antenna for wireless USB dongle applications [J]. *Electron Lett*, 2008, 44(18): 1057 – 1058.
- [11] Y C Lin, K J Hung. Compact ultrawideband rectangular aperture antenna and band-notched designs [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2006, 54(11): 3075 – 3081.
- [12] C Y Huang, S A Huang, et al. Band-notched ultra-wideband circular slot antenna with inverted C-shaped parasitic strip [J]. *Electron Lett*, 2008, 44(15): 891 – 892.
- [13] C J Pan, C Lee, et al. Band-notched ultrawideband slot antenna [J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2006, 48(12): 2444 – 2446.
- [14] S W Qu, J L Li, et al. Ultrawideband striploaded circular slot antenna with improved radiation patterns [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2007, 55(11): 3348 – 3353.

作者简介:



叶亮华 男, 1984 年生于赣州, 华南理工大学电子与信息学院硕士研究生, 研究方向为多频天线和超宽带天线的设计.

E-mail: lianghua.ye@mail.scut.edu.cn

褚庆昕 男, 1958 年生于陕西, 华南理工大学电子与信息学院教授、博士生导师、射频与无线技术研究所所长. 目前主要研究领域包括无线通信中的射频电路和天线、微波集成电路的全域建模、有源集成天线与空间功率合成、计算电磁学等.

E-mail: qxchu@scut.edu.cn