

带三角形槽梯形印制单极超宽带天线

李伟文 陈杰良 蔡立绍 游佰强

(厦门大学电子工程系, 厦门 361005)

wwl@xmu.edu.cn

摘要: 通过对印制单极天线结构分析, 设计了一款带三角形槽梯形印制单极超宽带天线, 并对其频域和时域特性进行验证。天线尺寸为 30mm×30mm, 实验结果表明, 该天线的阻抗带宽为 2.8GHz~11.8GHz, 在此频段内, 天线性方向性基本稳定, 并具有较高的辐射效率。仿真结果表明, 在短距离范围, 天线具有线性相频特性, 对脉冲信号的保真度高。采用矩形接地面结构, 简化了天线的设计。辐射元引入槽口, 不会对原天线的辐射特性产生影响, 有助减少整个超宽带系统的尺寸。该天线具有实际应用意义。

关键词: 超宽带, 印制天线, 单极天线, 辐射特性

Trapezoid Printed Monopole UWB Antenna of Triangular Slot

LI weiwen, CHEN jieliang, CAI lishao, YOU baiqiang

(Department of Electronic Engineering, Xiamen University of China, Xiamen 361005)

Abstract: The configurable characteristics of printed monopole antenna having been discussed, a trapezoid printed monopole Ultra Wideband (UWB) antenna of triangular slot is constructed to analyze the frequency-domain and time-domain performance of radiation field. The antenna size is 30mm × 30mm. The experimental results show this antenna has stable radiation pattern and high radiation efficiency within the impedance bandwidth from 2.8GHz to 11.8GHz. The simulation results indicate, in short communication range, this antenna has linear phase-frequency performance and good fidelity for the pulse signal. This antenna has simple rectangular ground plane. The triangular slot in the radiator has no effect on the antenna performance. The proposed antenna can be applied in practice UWB system and reduce its size.

Keywords: Ultra wide band; Printed antenna; Monopole antenna; Radiation performance

1 引言

自美国联邦通信委员会 (FCC) 规定 3.1GHz~10.6GHz 用于超宽带 (UWB) 通信, 超宽带技术得到飞速发展。作为 UWB 系统关键技术之一的超宽带天线, 其性能的优劣直接决定着 UWB 通信质量。

传统的非频变天线, 用于 UWB 时存在着固有缺点。除了体积较大外, 这些天线没有固定的相位中心。而 UWB 利用纳秒级的窄脉冲信号, 如果相位响应是非线性的, 传输的信号将发生失真。

基于以上原因, 具有平面结构的微带贴片天线最早成为 UWB 天线研究的热点。人们探索了多种方法试图拓宽其频带, 如采用多回路、分层结构、刻槽等技术。但贴片天线的窄带结构, 注定其频带展宽达不到 UWB 要求。

而特殊设计的印制单极天线, 较容易满足 UWB 技术要求。它通过辐射元、接地面和馈电结构之间的优化来展宽频带^[1-3]。印制单极超宽带天线的振子体有矩形、圆形、菱形、水滴形等多种形状^[4, 5]。

本文设计了一款带三角形槽的梯形印制单极超宽带天线, 其尺寸为 30mm × 30mm, 天线反射系

数小于 -10dB 的阻抗带宽范围为 2.8GHz ~ 11.8GHz, 倍频带宽达到 4.2: 1。

2 印制单极天线分析

天线的带宽特性可用品质因数 Q 值来分析^[6], 其计算公式可表示为^[7]

$$Q = 1/(kR)^3 + 1/(kR) = f_c / BW \quad (1)$$

式中 k 为波数, R 为边界球半径, f_c 为中心频率, BW 为工作带宽。可见, 天线阻抗带宽与 Q 值成反比: 天线的电尺寸越小, 品质因数越高, 频带越窄。为实现超宽带阻抗特性, 应采用低 Q 值天线。

对于印制天线, 当不考虑馈电结构时, 介质基板的厚度和介电常数是影响天线 Q 值的主要因素。在一定范围内, 厚基板与空气分界面大, 其电容效应小, 对电磁能的束缚较弱, 耗散到空间能量也多, 因此天线 Q 值低。但随着基板厚度进一步增加, 基板上激起的表面波增强, 从而降低天线的辐射效率; 同时还影响天线输入阻抗的频率特性, 主要表现为随基板厚度增加, 频带内输入阻抗波动变大, 阻抗匹配变得困难。对于介质基板, 其介电常数值越小, 与空气特性阻抗相差越小, 经分界面耗散到空气中的能量就越多, 天线 Q 值越低。但减小介电常数将会增加天线的尺寸, 不利于小型化的实现。

可见, 设计印制天线时, 要按需要对其带宽、效率和增益进行平衡。对于超宽带印制天线, 应在小型化和保证天线辐射效率的基础上降低 Q 值, 因此介质基板的选材尤为重要。综合考虑, 本设计天线选用 F4BK-2 基板, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 介质板厚度 $h = 1.5\text{mm}$, 敷铜层厚度为 0.035mm 。

为简化结构, 设计天线采用微带线馈电。在频率不太高时, 微带线传输模特性与 TEM 模相差很小, 即为准 TEM 模; 但频率较高时, 微带中会出现波导型横向谐振模。在不激励起高次模的前提下, 随频率升高, 准 TEM 模的相速度将减小, 即有效介电常数增大, 微带线的电磁场更集中于介质基板内。作为一阶近似, 考虑频率影响时微带线特性阻抗可由下式给出^[8]

$$Z_{cf} = Z_c \frac{\epsilon_{ref} - 1}{\epsilon_{re} - 1} \sqrt{\frac{\epsilon_{re}}{\epsilon_{ref}}} \quad (2)$$

式中, Z_c 和 ϵ_{re} 为不考虑频率影响时微带线的特性阻抗和等效相对介电常数, 而 ϵ_{ref} 为考虑频率影响时微带线的等效相对介电常数。

由于超宽带天线工作带宽较大, 必须考虑微带馈线的色散效应。设计天线采用 50Ω 微带馈电结构, 结合所选取基板材料, 最后取微带线宽为 4mm , 长度为 16mm 。

矩形辐射元结构是印制单极超宽带天线的最基本原型, 它可看作粗振子柱状宽带单极天线的等效变形。对于矩形振子体, 其长 L_p 和宽 W_p 尺寸可由以下公式估算^[9]

$$W_p = \frac{c}{2f_c} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_{re} + 1}} \quad (3)$$

$$L_p = \frac{c}{2f_l \sqrt{\epsilon_{re} + 1}} - 2\Delta l \quad (4)$$

式中 c 是光在真空中的传播速度, ϵ_{re} 是介质基板的有效相对介电常数, f_l 和 f_c 是天线工作频带的低频点和中心频点, Δl 为考虑基板厚度引入长度修正因子。

对于粗振子柱状单极天线, 产生辐射场的电流分布在振子柱表面。类似地, 印制矩形单极天线, 辐射时电流主要分布于矩形辐射器的下边缘和两侧边, 而矩形元中间和上边缘的电流很弱, 对辐射场贡献不大。因此, 从上边缘向下开一槽口, 尺寸合适的话, 对原来的辐射特性影响不大。

如果在电流分布较强的两侧边或底侧开窄缝隙, 则相当在矩形辐射元中嵌入缝隙天线, 在某频点, 其辐射场可能与原单极天线辐射场产生反相抵消, 从而形成带阻特性。但如果缝隙位置选择得当, 针对较难克服的频点设计缝隙长度, 反而有助于超宽带特性的实现。

利用以上分析, 按图 1 所示在矩形辐射器上开矩形槽口, 作为本设计的原型天线 (以下简称叉指形天线), 以资比较。经过仿真优化后原型天线的尺寸列于表 1。

表 1 天线的几何尺寸 (单位: mm)

w	l	l _g	t	w ₂	g	l ₂	w _p	l _p	w ₁	l ₁
30	30	16	4	6	1.2	4	16	16	8	8

3 带三角形槽梯形超宽带单极天线

由前一节也可知, 印制单极天线的谐振长度主

要由辐射元底部开始的侧边线长决定，因此为进一步展宽阻抗带宽或减少振子面积，可把辐射元形状由矩形变为梯形。

印制单极天线本质上是谐振天线，在较宽的频带范围内应有多个谐振点，而超宽带特性的实现，就需增加相邻谐振点的回波损耗带宽。辐射器的设计，能展开对应谐振点的阻抗带宽，但不一定能实现包括两个谐振点的阻抗带宽要求，这需要馈电结构或接地面形状的设计。

事实上，梯形辐射元结构，从另一个角度看，就是对接地面形状的调整，这与底边侧切两个倒角以改善阻抗匹配的功能一致。利用高频端阻抗匹配情形更能说明问题，因为随着频率升高，谐振波长变短，电流主要分布在振子体下侧边，因此与之相耦合较强的接地面区域也应变短，梯形结构较短下底长度恰好能满足这一要求，从而实现阻抗匹配的宽带化。可见，这与非频变天线的相似性原理是类似的。

为研究开槽结构对天线整体工作性能（包括时域特性）影响，如图 2 所示，在梯形振子体中挖三角形槽缝，形成带三角形槽梯形印制天线（以下也简称梯形天线）。图 2 标示的天线几何尺寸与图 1 一致，具体参数也由表 1 给出，即两天线基本结构参数一致。图 2 梯形天线的上半边长取为 $w_3 = 13\text{mm}$ 。

图 1 与图 2 两天线阻抗带宽的仿真结果示于图 3。可以看出，叉指形天线反射系数小于 -10dB 的阻抗带宽是 $3.51\text{GHz} \sim 10.36\text{GHz}$ ，倍频带宽为 2.95:1。而带三角形槽梯形天线的阻抗带宽是 $3\text{GHz} \sim 10.8\text{GHz}$ ，倍频带宽为 3.6:1，达到 FCC 的频带要求。这是由于梯形天线拉长了辐射元的侧边长，使天线的第一个谐振点向低频方向移动，由图 3 可见，其向低频方向大致移动了 0.51GHz 。由于梯形辐射元与接地面形成渐变镜像结构，增加了天线对高频端电抗的自补偿能力，高频谐振点向上平移。

图 4 为梯形天线阻抗带宽的仿真和实测结果对比。可以看到，两曲线的变化趋势具有较好的一致性。在低频端，实测值接近仿真值，但高频端实测值与仿真值出现较大偏差。一般小天线测量时，不同频点设备射频电缆对天线性能影响不同。在低频时，电缆对回波损耗影响较小，与图 4 的情形基本相符，这也表明低频时阻抗匹配设计对接地面的依赖较小。在高频时，电缆对回波损耗影响的增加，同时在连接处可能产生泄漏辐射，一般会引起实测

反射系数模值的降低。由图 4，频带范围内最大反射系数的仿真频点为 7GHz ，其值约为 -12.2dB ，而实测频点为 11GHz ，其值约为 -10dB ，这表明本次测量电缆对天线阻抗特性的影响较少。天线实测工作带宽范围为 $2.8\text{GHz} \sim 11.8\text{GHz}$ 。

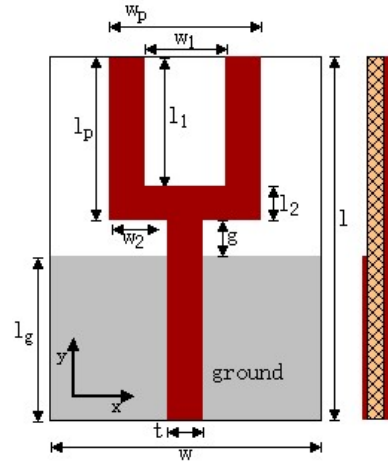


图 1 叉指形原型印制单极天线结构

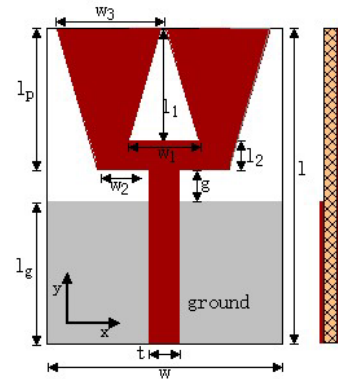


图 2 带三角形槽梯形印制单极天线结构

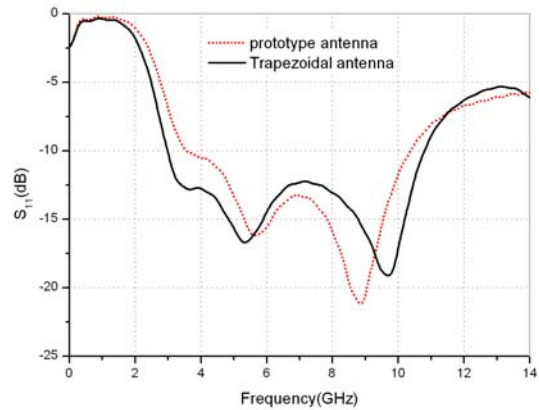


图 3 叉指形结构与梯形结构印制单极天线阻抗带宽仿真结果

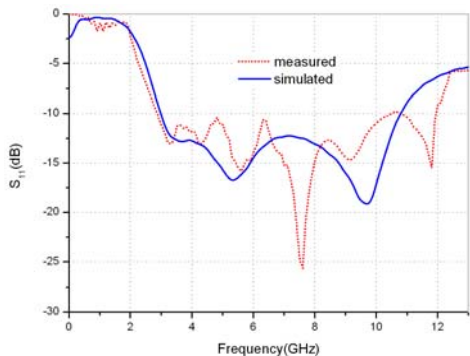
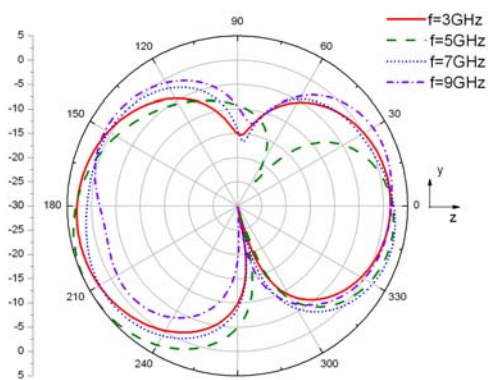
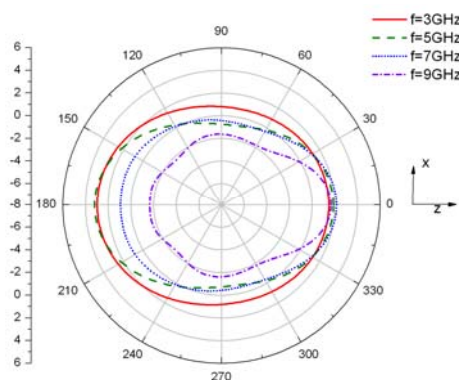


图4 梯形印制单极天线回波损耗仿真与实测值

图5为梯形天线工作带宽内几个频点的方向性仿真结果。由图5(a)可以看出,在 yo z平面(E 面),辐射方向图与单极线天线类似,以导体面为近似对称面,最大辐射方向在导体面的法向。随着频率的升高,辐射方向图变化不大。图5(b)为 xo z平面(H 面)的方向图,可以看出,在低频时近似为全向分布,但随频率的升高方向图形状发生了较大变化,并可能出现多瓣现象。以上特点可由天线不同频点的电流分布得到说明。



(a) yo z面(E 面)方向图



(b) xo z面(H 面)方向图

图5 梯形天线在3、5、7和9GHz时的方向图

图6为梯形天线增益的测量值和天线效率仿真结果。可以看出,在3GHz~10GHz范围,天线的增益在1.7dB~4.2dB之间,变化最大值为2.5dB,满足增益变化小于3dB的增益带宽要求,表明天线有较好的辐射场方向稳定性。在工作频率范围内,天线效率在70%~90%之间,说明天线的辐射效率较高,其原因是采用了较低介电常数的低损耗基板,同时有良好的阻抗匹配。

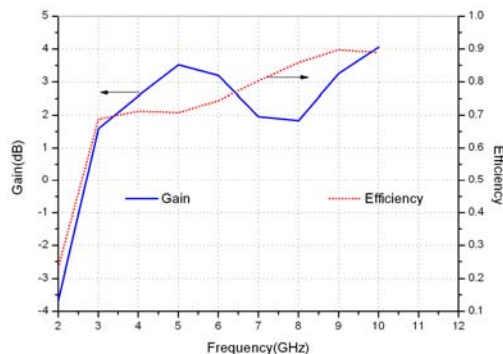


图6 梯形天线增益的实测值和辐射效率的仿真值

4 带三角形槽梯形天线时域特性

与传统通信不同,超宽带通信系统的短脉冲信号直接代表信号内容,因此要求超宽带天线有较高的信号保真度,天线的时域特性将直接决定超宽带天线传输信号的质量。

常使用基本高斯脉冲作为超宽带通信的激励信号,因为其频谱仍为高斯函数。但基本高斯脉冲的频宽比FCC规定的阻抗带宽大,如天线阻抗带宽按FCC规定的范围设计,则由于天线的带通滤波器特性,将抑制脉冲的高频成份,产生信号的失真。

为此人们提出了各种改进的脉冲信号,如高阶高斯脉冲、正弦调制高斯脉冲、基于近似扁长椭圆波函数的脉冲、Hermite多项式函数脉冲及基于正交小波脉冲等^[10]。但上述几种脉冲信号的频谱范围也未能很好满足FCC频谱限制。

基于此,利用五阶微分高斯脉冲作为UWB激励源,研究设计天线的时域特性。五阶微分高斯脉冲信号形式为^[11]

$$G_5(t) = A \left(\frac{-t^5}{\sqrt{2\pi}\alpha^{11}} + \frac{10t^3}{\sqrt{2\pi}\alpha^9} - \frac{15t}{\sqrt{2\pi}\alpha^7} \right) * \exp\left(-\frac{t^2}{2\alpha^2}\right) \quad (5)$$

为分析设计天线的远场时域响应特性，在距离天线不同距离处分别放置探针，探测远场处的电场强度随时间变化波形图。图 7 为梯形天线的远场时域响应仿真波形。图 7 (a) 为距离天线 30mm 处的时域响应波形，比激励信号有 0.4ns 的延迟，振铃现象不明显，电场强度较大。图 7 (b) 为距离天线 200mm 处的时域响应波形，存在 0.75ns 的传输延迟，电场强度较 30mm 处下降很多，出现了较为明显的振铃现象。总体来说，带三角形槽梯形超宽带天线具有良好的时域特性，在短距离内天线远场波形保真度高，没有发生畸变，并且天线本身的传输延迟较低。同时也可看到，超宽带适合短距离通信，随着距离的增加，天线的辐射性能降低较快；随着传输延迟增加，振铃现象加重。结果表明，印制单极天线辐射元开槽，对天线时域特性不产生影响，这与前面分析结果相一致。

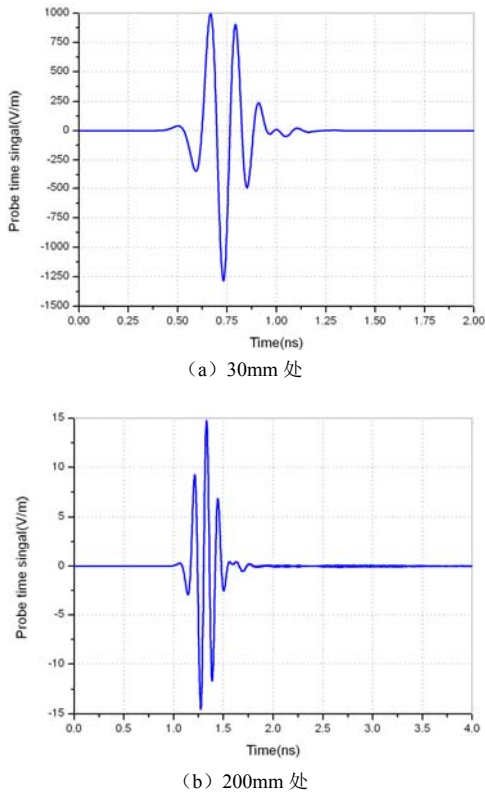


图 7 天线远场区不同距离处辐射电场时域波形

传统的超宽带天线，如阿基米德螺旋天线、对数周期天线等，它们的阻抗带宽和方向图带宽都很宽。但这些天线都没有考虑瞬态响应过程，不同频谱将从天线的不同部分辐射出去，并不是天线的每个部分都参与整个频带的辐射，因此天线的相位中心是一个随着频率变化的值，直接导致了信号时域

上的色散。

印制单极天线电尺寸较小，天线的各个部分对于整个频段均有辐射，所以相位中心变化很小，传输信号的相频特性也将呈线性变化。图 8 为梯形天线远场辐射的相位特性。可以看出，在近距离通信，梯形天线能保持良好的线性相频特性。图 8 (a) 显示，在 2.5GHz ~ 7.7GHz 范围内，相频特性并非完全线性变化，但是非线性率较小，能够满足超宽带通信的要求。随着远场距离的增加，天线相位特性的线性变化率变高。

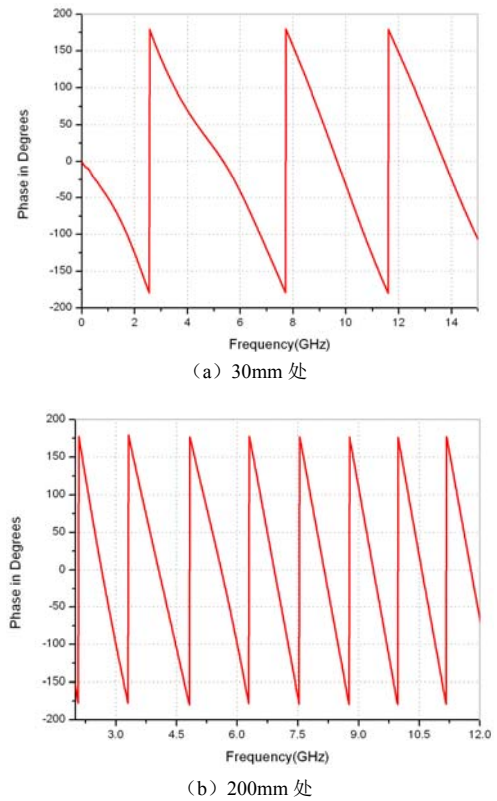


图 8 天线远场区不同距离处辐射场的相频特性

5 结论

设计了阻抗带宽为 2.8GHz~11.8GHz 的带三角切口的梯形超宽带印制单极天线，在阻抗带宽内，天线的辐射效率较高，方向性基本保持不变，相位中心稳定。结果表明，利用梯形辐射元，不必引入复杂的接地面结构，即可实现印制单极天线的超宽特性。在辐射元合适位置引入槽口，对天线的频域和时域特性不产生影响，可在此位置引入其它微波元件，以减少整个超宽带系统的尺寸。

参 考 文 献

- [1] Jorge R. Costa, Carla R. Medeiros, Carlos A. Fernandes. Performance of a crossed exponentially tapered slot antenna for UWB systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57 (5) : 1345-1352.
- [2] Petr Černý, Milos Mazánek. Ultra wideband dipole antenna optimization. *Automatika*, 2006, 47: 121-125.
- [3] Q Wu, R H Jin, J P Geng, *et al.* Printed omni-directional UWB monopole antenna with very compact size. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56 (3) : 896-899.
- [4] Amin M. Abbosh, Marek E. Bialkowski. Design of ultrawideband planar monopole antennas of circular and elliptical shape. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56 (1) : 17-23.
- [5] Zhi Ning Chen, Terence S P See, Xianming Qing. Small printed ultrawideband antenna with reduced ground plane effect. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55 (2) : 383-388.
- [6] 赵旭东, 张小苗, 白雪, 李晋阳, 王银行. 一种基于 Q 值理论的新型电小天线. *电波科学学报*, 2008, 4 (25): 757-760.
- [7] Mclean, James S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1996, 44 (5): 672-675.
- [8] E. Hammerstad, O. Jensen. Accurate models for microstrip Computer-Aided Design. 1980 IEEE MTT-S international Symposium Digest, Washington, DC, USA, 1980: 407-409.
- [9] Xuncai Yin, Chengli Ruan, Jiahui Chu. A new band-notched printed monopole antenna for UWB applications. 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008, 4: 1818-1821.
- [10] 王勇, 于大鹏. 一种用于 UWB 通信的正弦调制高斯脉冲. *无线通信技术*, 2005, 31 (1): 9-11.
- [11] H. Sheng, P. Orlik, A.M.Haimovich *et al.* On the spectral and power requirements for ultra-wideband transmission. In *Proc. IEEE Int. Conf. Communications*, Anchorage, AL. 2003, 1: 1738-742.

作者简介:

李伟文, 男, 副教授, 主要研究领域为微波无源器件及天线技术、微波光子学等。