

文章编号: 2095-4980(2019)06-1051-05

超宽带纳秒脉冲在带通滤波器中传输特性研究

梁勤金, 王 艳, 石小燕

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 根据超宽带(UWB)纳秒电磁脉冲的基本特性, 采用模拟计算仿真与实验研究方法, 研究了超宽带纳秒电磁脉冲信号通过微波接收机带通滤波器的时域、频域传输特性, 初步认识了超宽带纳秒电磁脉冲通过带通滤波器传输特性规律, 它是对传统连续波(CW)信号与脉冲调制信号通过微波带通滤波器传输特性技术的补充和完善。该研究成果为将来开发超宽带纳秒电磁脉冲在各类接收机中的应用提供技术基础。

关键词: 超宽带纳秒脉冲; 微波带通滤波器; 传输特性

中图分类号: TN802

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.1051

Research on transmission characteristics of ultra wide band nanosecond pulse in microwave band pass filter

LIANG Qinjin, WANG Yan, SHI Xiaoyan

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The basic transmission characteristics of Ultra Wide Band(UWB) nanosecond electromagnetic pulse signal via microwave receiver Band Pass Filter(BPF) is explored on time domain and frequency domain by using simulation calculation and experimental methods. It is the complement to the transmission characteristics study of traditional Continuous Wave(CW) signal and pulse modulation signal through microwave BPF. A preliminary law of transmission characteristics of UWB nanosecond electromagnetic pulse signal through microwave BPF is obtained, which can provide technical basis for the future applications of UWB nanosecond electromagnetic pulses in all kinds of receivers.

Keywords: UWB nanosecond pulse; microwave Band Pass Filter; transmission characteristics

微波带通滤波器是雷达、通信、电子对抗等接收机的重要组件。微波带通滤波器主要用途是滤出干扰信号, 提取有用信号。多年来超宽带纳秒、亚纳秒电磁脉冲信号在雷达、通信、电子对抗等接收机中具有怎样传输和相互作用, 对应研究工作重点和方向并不系统和深入, 偶尔有公开论文发表, 但论文数量稀少^[1]。其主要原因: 一方面是接收机本身功能强大, 系统复杂, 微波前端涉及限幅、滤波、放大、混频、检波、信号处理等复杂内容, 其传统电子学教科书虽有理论描述, 但对高压大电流超宽带纳秒电磁脉冲信号在接收机中的传输及相互作用机理, 理论认识并不多, 实验研究更稀少, 所以发表公开论文数量有限; 另一方面超宽带纳秒、亚纳秒电磁脉冲频谱很宽, 其在高压大电流下作用于复杂接收机, 过程机理复杂, 其包括非线性在内的物理、数学规律性认识不足。在过去许多年, 研究人员主要精力集中在研究带内高功率高压电磁脉冲对接收机系统及其电子元器件干扰、扰乱、破坏甚至损伤效应^[1-2], 而对接收机带外高压电磁脉冲传输规律性认识不够。作者在研究纳秒脉冲宽度的超宽带电磁脉冲在接收机中的传输规律时, 发现一特殊实验现象: 在接收机输出端出现了能量相对较高的多频谱分量高频信号, 这一信号并非简单单一重复脉冲信号傅氏谐波分量。本文试图研究纳秒电磁脉冲在接收机传输过程的传输特性, 找到其传输规律: 接收机收发正常信号与干扰信号, 在接收机传输过程中, 不仅要考虑其带内时、频域特性, 而且其带外时、频域特性也要统筹考虑。本文对超宽带纳秒电磁脉冲在微波带通滤波器中传输特性进行研究, 获得了初步研究成果。

收稿日期: 2018-04-25; 修回日期: 2018-06-13

基金项目: 国防科技重点实验室资助项目(HAK-2014-HPM-10)

1 超宽带纳秒电磁脉冲仿真计算波形模型选择

超宽带纳秒脉冲信号采用高斯型脉冲模型，通用表达式为：

$$w(t) = Ae^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}, A = \left(\frac{2E_p\sqrt{\pi}}{\tau}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中： E_p 为脉冲能量； τ 为脉冲宽度参数； T_p 为脉冲宽度(半峰宽度)，与 τ 的关系为：

$$T_p = \sqrt{2\pi}\tau \quad (2)$$

高斯模型及其衍变模型在理论分析中获得广泛应用。实际工程中大多采用 Robert J. Fontana 学术论文《Recent System Application of Short-Pulse Ultra-Wideband Technology》^[1]中的 Scholtz 单周脉冲模型，该模型更接近实际工程波形信号。如图 1 所示，Scholtz 单周期脉冲模型时域、频域表达式如下：

$$\begin{cases} w(t) = A[1 - 4\pi(t/\tau)^2]e^{-2\pi(t/\tau)^2} \\ W(f) = (A\pi/\sqrt{2})\tau(f\tau)^2 e^{-\pi(f\tau)^2/2} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $A = [(8E_p)/(3\tau)]^{\frac{1}{2}}$ ， E_p 为电磁脉冲能量(非峰值功率)； τ 为脉冲宽度参数，与脉冲宽度 T_p (半峰宽度)的关系为 $T_p = \sqrt{\pi}\tau$ 。

Scholtz 单周脉冲模型的频谱峰值功率点位置为： $f_p = \sqrt{2/\pi}/\tau$ 。

实际工程超宽带纳秒电磁脉冲信号及其频谱特性如图 2 所示。其脉冲宽度为 540 ps，主能量带宽在 100 MHz~2GHz 以内，2~4 GHz 频带内仍有一定频谱分量^[3-4]。

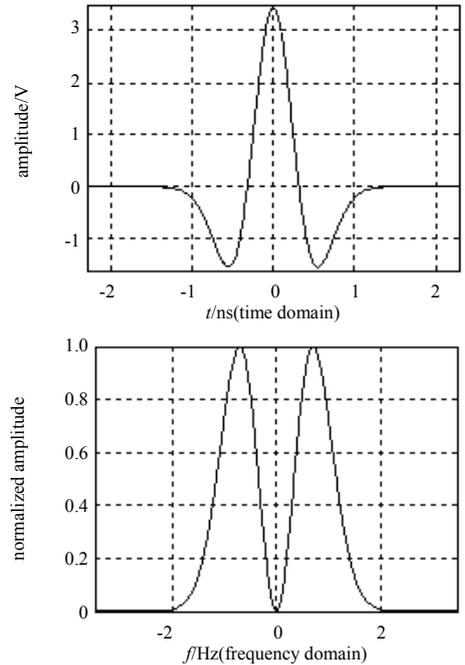


Fig.1 Model of Scholtz single periodic pulse
图 1 Scholtz 单周期脉冲模型

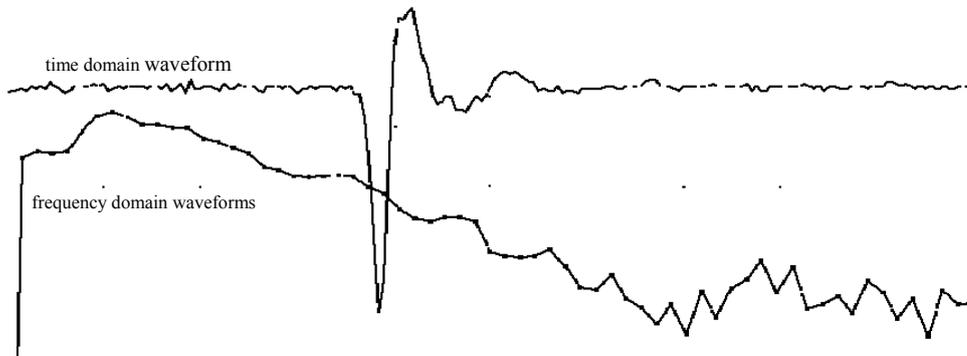


Fig.2 Voltage waveforms and frequency characteristics of UWB nanosecond electromagnetic pulse
图 2 超宽带纳秒电磁脉冲信号电压波形及其频率特性

2 超宽带纳秒脉冲在微波带通滤波器(P 波段)中传输特性模拟计算与仿真分析

以 Mini-Circuits 公司的平行耦合微带带通滤波器 RBPF-485 为例，根据其微波滤波器参考技术手册，主频在 485 MHz 附近。将图 2 所示超宽带纳秒电磁脉冲注入到图 3 所示的平行耦合微带带通滤波器，研究其超宽带纳秒电磁脉冲在其带通滤波器(P 波段)传输特性。

图 4 为带通滤波器 RBPF-485 幅—频特性；图 5 为超宽带纳秒电磁脉冲通过主频匹配带通滤波器后幅—频特性，其带通滤波器低频端抑制较强，高频端抑制较弱；图 6 为超宽带纳秒电磁脉冲通过主频匹配带通滤波器后时域特性，其带通滤波器输出时域有脉冲宽度被展宽现象。

仿真结果分析如下：

1) 超宽带纳秒脉冲通过带通滤波器作用后，带宽变窄，脉冲宽度被展宽，脉冲前、后沿的上升及下降过程变得缓慢。带外抑制衰减随频率增高而逐渐减弱，说明主频匹配带通滤波器对压制超宽带纳秒脉冲的高频频谱分量随频率增高而逐渐减弱。其时域输出波形不仅在时域上展宽，而且输出了杂波谐波等杂散信号，该信号在

接收中很难用简单单一方法滤出，为后续接收机信号处理带来较高的技术难度。

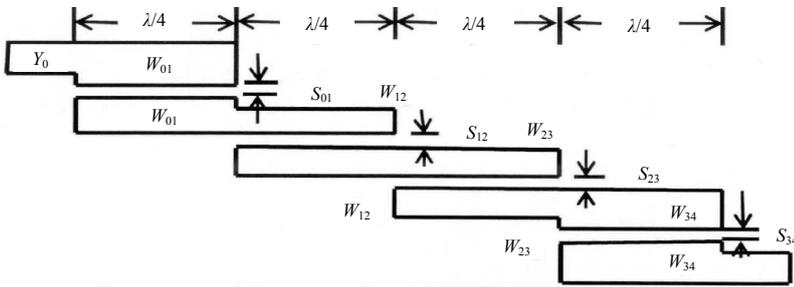


Fig.3 Model of parallel microstrip coupled BPF(Mini-circuits Corp. RBPF-485)
图 3 平行耦合微带带通滤波器模型(Mini-Circuits 公司 RBPF-485)

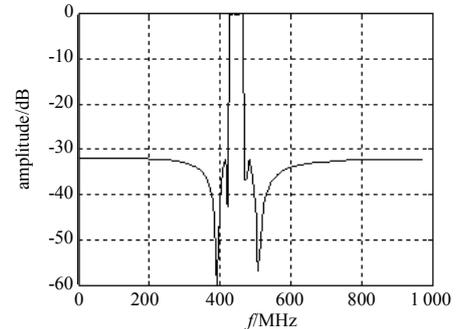


Fig.4 Amplitude frequency character of RBPF-485
图 4 带通滤波器 RBPF-485 幅-频特性

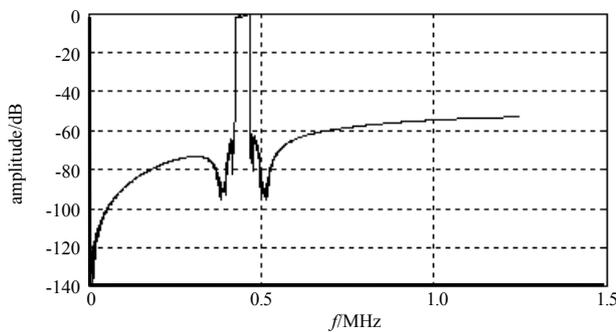


Fig.5 Amplitude frequency characteristic of UWB nanosecond electromagnetic pulse via main frequency matched BPF
图 5 超宽带纳秒电磁脉冲通过主频匹配带通滤波器后幅-频特性

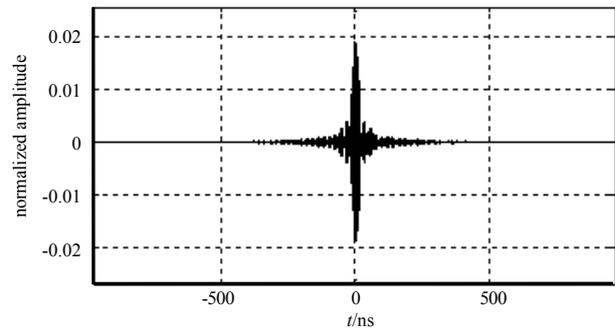


Fig.6 Characteristic of time domain for UWB nanosecond electromagnetic pulse via main frequency matched BPF
图 6 超宽带纳秒电磁脉冲通过主频匹配带通滤波器后时域特性

2) 图 3 可知，平行耦合微带带通滤波器结构简单，在通带内都表现出较好的通带性能。但这种滤波器阻带相对较窄，有效抑制高次谐波能力差。当用该类滤波器传输超宽带纳秒脉冲信号时，高频段谐波信号可以以相对较小的衰减通过滤波器，如果该滤波器输出被后端宽带饱和放大器放大之后，将产生复杂、难以消除的杂散干扰信号，对后端信号处理带来极大困难，使其信号处理功能严重减弱。

3) 超宽带重复频率脉冲频域响应的包络为 sinc 函数，其频域响应呈离散谱线分布，且离散谱线的间距为脉冲周期的倒数，即脉冲重复频率。当接收机工作频率为该超宽带纳秒脉冲重复频率整数倍的离散谱线频率时，其接收机很难滤出、消除这样特殊、有规律的信号^[5-6]。

3 实验研究超宽带纳秒电磁脉冲在带通滤波器(X 波段)中的传输特性

实验研究超宽带纳秒电磁脉冲通过 X 波段带通滤波器传输特性，其测试框图如图 7 所示。

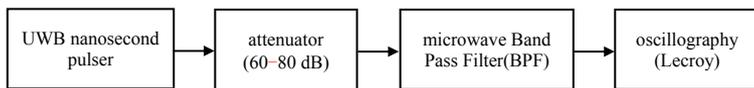


Fig.7 Schematic of tested transmission characteristic of UWB nanosecond electromagnetic pulse via X band BPF
图 7 超宽带纳秒电磁脉冲在 X 波段带通滤波器传输特性测试框图

图 8 为超宽带纳秒电磁脉冲 X 波段带通滤波器传输特性实验测试图。表 1 为 X 波段带通滤波器实验测试数据。

图 9 为 X 波段滤波器输出电压时域测试波形，脉宽 540 ps 的超宽带信号时域展宽到约 20 ns。在 X 波段带通滤波器 9.1~9.7 GHz 带宽外发现了众多高频端频率分量，频率约在 13.32~18.45 GHz 范围内，图 10 为矢量网络分析仪

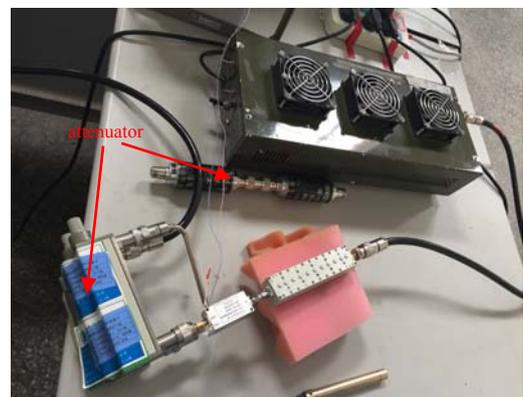


Fig.8 Experimental test of transmission characteristic of UWB nanosecond electromagnetic pulse via X band BPF
图 8 超宽带纳秒电磁脉冲 X 波段带通滤波器传输特性实验测试图

测试的 X 波段带通滤波器幅度-频率特性, 可以发现在 X 波段带通滤波器 9.1~9.7 GHz 带宽外, 高频端频率抑制减弱。

表 1 X 波段带通滤波器实验测试数据

Table 1 Experimental data of X band BPF

name/type	work frequency range /GHz	output positive peak voltage/mV	output reverse peak voltage/mV	output peak frequency/GHz	output peak power/dBm
X-band BPF(FL2CX9CX4CL11)	9.1-9.7	12.1	-10.1	9.4	-22.57

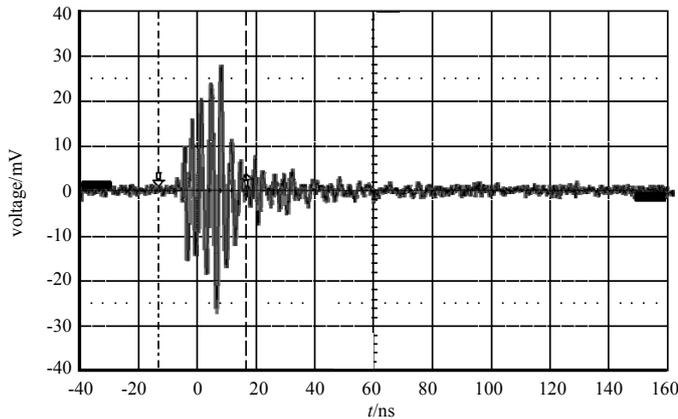


Fig.9 Output voltage waveforms of X band BPF on time domain
图 9 X 波段滤波器输出时域电压波形

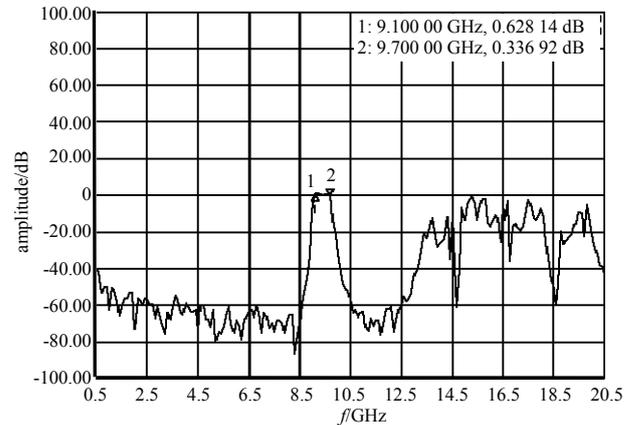


Fig.10 Tested amplitude frequency characteristic of X band BPF by using vector network analyzer
图 10 矢量网络分析仪测试 X 波段带通滤波器幅度-频率特性

通过上述实验测试可知:

1) 当超宽带纳秒电磁脉冲信号注入微波滤波器(X 波段)时, 其时域超宽带纳秒脉冲被展宽, 频域出现了较丰富、能量较高的杂散频率信号, 其杂散频谱宽度较宽(主要集中在向 X 波段高频端延伸)。主要原因是滤波器带外抑制衰减随频率增高而减弱, 在 X 波段延伸的高频段滤波器带外抑制衰减最弱, 图 10 实验测试结果与实验前(图 6 给出的模拟计算与仿真结果)完全一致。

2) 超宽带纳秒电磁脉冲信号通过微波带通滤波器(X 波段)时, 在完成同频段滤波功能的同时, 滤波器还输出了其他能量相对较高、杂散频率更高、有一定带宽的杂散频率信号。这一特殊现象说明: 微波带通滤波器对输入超宽带纳秒电磁脉冲中超出带外向 X 波段高频段延伸的频率并没有滤波作用, 这也是超宽带纳秒电磁脉冲通过微波带通滤波器(X 波段)区别于传统单频信号通过微波滤波器(X 波段)独特现象。超出带通滤波器带外向 X 波段高频段延伸的频率信号还是一个具有一定带宽多频输出的复频信号, 这一复频信号具有一定带宽的杂散频率信号, 接收机后端难以简单消除和处理^[7-11]。

4 结论

通过模拟计算仿真与实验研究, 获得了超宽带纳秒电磁脉冲信号通过微波带通滤波器的基本时域、频域传输特性。超宽带纳秒电磁脉冲信号通过微波带通滤波器出现的时域展宽、频域中出现了能量较高、有一定带宽、频谱较丰富的杂散频率信号, 这一频谱丰富的杂散频率信号将给接收机带来难以简单滤除的干扰信号, 恶化接收机前端输出信噪比, 使接收机检测性能下降。出现这一现象与超宽带纳秒电磁脉冲信号自身信号特性相关, 同时也与滤波器结构、功能及相关技术参数有关。其注入接收机带通滤波器的超宽带纳秒电磁脉冲信号属于复频超宽频谱信号, 与接收机前端包括带通滤波器在内的相互作用过程复杂, 给接收机正常信号检测理论与实验量化研究带来较大技术困难和挑战, 需要下一步更深入研究。

参考文献:

- [1] CAPRIO A.J. How receivers respond to pulses[J]. Defense Electronics, 2011:26-29.
- [2] EFANOV V M. Fast Ionization Devices(FID)-a new class of superpower switches[C]// Conference Record of the 2000 20th International Power Modulator Symposium. Norfolk,VA,USA:IEEE, 2002:66-68.
- [3] ZAOLIN S V. High repetition frequency picosecond pulse generation[C]// IEEE Conference Record of Power Modulator Symposium. [s.n.], 2002:403-405.

- [4] 梁勤金,马弘舸,石小燕. 超宽带脉冲在接收机中非线性特性研究[J]. 强辐射技术与应用, 2014,13(2):37-42. (LIANG Qinjin,MA Hongge,SHI Xiaoyan. Nonlinear characteristics research on ultra-wideband pulses in the receiver[J]. Directed Energy Technology and Applications, 2014,13(2):37-42.)
- [5] 梁勤金,石小燕,潘文武. 高压快速离化半导体开关及其脉冲压缩特性[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(8):2141-2144. (LIANG Qinjin,SHI Xiaoyan,PAN Wenwu. High voltage fast ionization semiconductor switch and its properties of pulse compression[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(8):2141-2144.)
- [6] 梁勤金,石小燕,冯仕云,等. 高功率半导体开关 DSRD 在 UWB 雷达中的应用[J]. 现代雷达, 2005,27(5):69-71. (LIANG Qinjin,SHI Xiaoyan,FENG Shiyun,et al. Application of high power solid state switch DSRD in UWB radar[J]. Modern Radar, 2005,27(5):69-71.)
- [7] FONTANA R J. Recent system application of short-pulse UWB technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004,52(9):2087-2096.
- [8] GREKHOV I V. Physical basis for high power semiconductor nanosecond and sub-nanosecond switches[J]. High Voltage Engineering, 1998,11(5):1318-1320.
- [9] BELKIN V S,SHULZHENKO G I. Generator of high voltage bipolar nanosecond pulses[J]. Instruments and Experimental Techniques, 1994,37(4):20-25.
- [10] 赵志远,朱璇,周学全. 基于 $\lambda/4$ 和非对称 $\lambda/2$ 谐振器的三阶微带滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(6):997-1003. (ZHAO Zhiyuan,ZHU Xuan,ZHOU Xuequan. Three-pole microstrip bandpass filters with high selectivity using mixed $\lambda/4$ and asymmetric $\lambda/2$ resonators[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(6):997-1003.)
- [11] 黄裕霖,鲍景富,邓迪. 微屏蔽三线对称结构带通滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(3):344-346. (HUANG Yulin,BAO Jingfu,DENG Di. Design of a passband filter based on three symmetric microshield transmission lines[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(3):344-346.)

作者简介:



梁勤金(1963-),男,四川省蓬溪县人,学士,研究员,主要研究方向为高功率微波技术及应用.email:liang2489623@163.com.

王艳(1975-),女,成都市人,学士,工程师,主要研究方向为高功率微波效应.

石小燕(1971-),女,成都市人,学士,高级工程师,主要研究方向为高功率微波技术及应用.