

重频超宽带脉冲对混频器的干扰特征分析

张永栋, 徐敏杰

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 重频超宽带脉冲可对多种电子设备与电子器件产生干扰; 针对电子器件的干扰效应, 着重从仿真分析和实验两方面研究了重频超宽带脉冲对无源混频器的干扰特征; 分析了混频器对超宽带脉冲信号的响应特性, 给出了不同参数条件下重频超宽带脉冲信号对混频器及混频滤波电路的干扰特征; 研究表明, 作为干扰信号, 重频超宽带脉冲信号并不能影响混频器正常工作; 当重频超宽带脉冲信号与通信信号一起注入混频器时, 混频器可实现其正常的变频功能, 而作为衡量混频器工作性能的重要指标, 变频损耗可认为基本不变; 重频超宽带脉冲信号经过混频滤波电路后变为同中频信号同样频率的连续波信号, 其对混频滤波电路的干扰以及之后电路的干扰类似定频连续波信号干扰。

关键词: 超宽带; 干扰; 混频器

Analysis of Interference Effects of Repetitive Ultra-wideband Pulses on Mixer

Zhang Yongdong, Xu Minjie

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Repetitive ultra-wideband pulses can interfere many kinds of electronic devices. For the interference effect on electronic devices, this paper mainly studied interference characteristics of repetitive ultra-wideband pulses on passive mixer through simulation analysis and experiments. The mixer response characteristics to repetitive ultra-wideband pulses are analyzed in this paper, and interference characteristics of the mixed filtering circuits caused by repetitive ultra-wideband pulses of different parameters are manifested. According to the study, repetitive ultra-wideband pulses can't interfere the mixer while working as interfering signal. When repetitive ultra-wideband pulses and communication signals are injected to the mixer together, frequency conversion function of the mixer can be achieved, and as an important indicator to measure the service behavior of the mixer, the converter conversion loss can be basically considered to maintain invariable. Repetitive ultra-wideband pulses turn into a continuous wave which shares the same frequency as IF signal after passing the mixed filtering circuits, whose interference to the mixed filtering circuits and the circuits after is similar to a fixed frequency continuous wave signal interference.

Keywords: Ultra-wideband; Interference; Mixer

0 引言

超宽带脉冲是指电场峰值较大的、上升时间在纳秒或亚纳秒量级、脉冲持续时间在纳秒 (ns) 或者亚纳秒量级、频谱宽度为几十 MHz~几个 GHz 的单极性或者双极性的非调制的电磁波^[1-4]。因超宽带脉冲具有前沿快、脉宽窄、频谱宽的特点, 可作为电子设备的干扰源。当前, 针对超宽带脉冲对电子设备的效应研究多集中于系统级的仿真和实验分析上。文献[5-8]分别介绍了超宽带脉冲对无线电引信、GPS 接收机、通信电台等电子设备的效应研究成果。而超宽带脉冲对电子器件的效应研究则较少, 且多侧重于超宽带脉冲对电子器件的毁伤效应研究上^[9-10]。针对超宽带脉冲对电子器件的干扰效应研究, 文献报道较少, 文献 8

研究了重频超宽带脉冲对低噪声放大器的干扰效应, 给出了重频超宽带脉冲对低噪声放大器的干扰特征以及脉冲参数对干扰特征的影响, 研究发现当满足一定参数要求的重频超宽带脉冲注入低噪声放大器时可压制低噪声放大器的正常输出。

接收机射频前端为电台等通信设备的关键环节, 其一般包含限幅器、低噪声放大器、滤波器、混频器等关键电子元件, 用以实现通信信号的接收、滤波、限幅、放大、和变频等功能。

混频器同低噪声放大器一样为通信设备接收机射频前端的重要组成部分, 其技术性能对通信设备接收机的关键指标有重要的影响。因此, 研究重频超宽带脉冲对混频器的干扰特征有助于分析重频超宽带脉冲对通信设备的干扰效应机理。

1 混频器工作原理

混频器是一种非线性时变电路, 依靠电路本身的非线

收稿日期: 2018-04-25; 修回日期: 2018-05-24。

作者简介: 张永栋(1982-), 男, 山东省济宁市人, 工程师, 主要从事电磁散射与效应方向的研究。

性来完成频率转换。根据所使用的非线性器件，混频器可分为二极管混频器、晶体管混频器和场效应管混频器；根据电路结构的不同，主要分为单管混频器、平衡混频器、环形混频器等；根据混频器的增益特性，可分为有源混频器和无源混频器。衡量混频器工作性能的主要指标有变频增益/损耗、工作频率、隔离度等。典型的混频器电路主要完成 3 个功能：乘法、放大/衰减、滤波。一个理想的混频器的输出由输入信号与本振信号的和频与差频组成。实际混频器的工作，通常是以二极管或晶体管提供的非线性为基础，因此，其输出会产生较多的频率分量^[1]。重频超宽带脉冲信号包含丰富的频谱分量，当作为干扰信号注入混频器时可能会对混频器的正常工作产生影响。

2 仿真分析

针对某型通信设备接收机射频前端所采用的无源混频器开展了仿真分析与实验研究。利用电路仿真软件自带的混频器模型，建立如图 1 所示干扰仿真模型，其中 PULSE 源用于模拟重频超宽带脉冲信号，而 RF 源用于模拟正常的通信信号，LO 源为混频器的本振信号源。为模拟某型通信设备接收机射频前端混频器的变频过程，所建立的仿真模型中的 RF 源、LO 源、混频器作如下设定：RF 源频率范围为 40~88 MHz，LO 源频率范围为 164~212 MHz，混频器下变频工作，输出 124 MHz 中频信号，且有 6.2 dB 左右变频损耗。

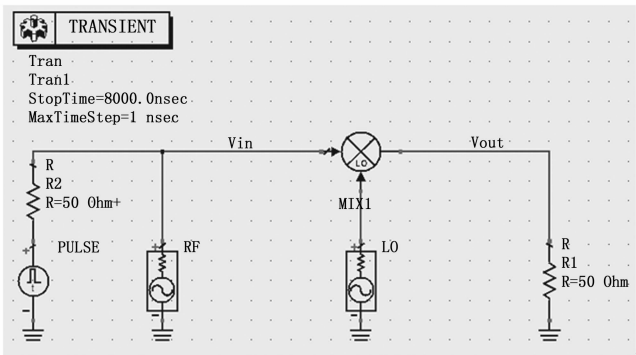


图 1 重频超宽带脉冲干扰混频器模型

所采用的电路仿真软件自带的混频器模型是一种理想模型，其输出主要由 RF 源输出信号和 LO 源输出信号的和频与差频组成。当只有频率为 60 MHz 正常通信信号注入混频器时，此时 LO 源信号频率为 184 MHz，混频器输出信号频谱如图 2 所示。此种情况下混频器输出同功率的差频信号（124 MHz）与和频信号（244 MHz）。

2.1 混频器对超宽带脉冲信号的响应

利用仿真软件形成如图 3 (a) 所示的类高斯型超宽带脉冲信号。当此种类型的单脉冲超宽带信号注入混频器时，混频器输出信号波形如图 3 (b) 所示。由图 3 (b) 可知，单脉冲超宽带信号经过混频器后幅值变小，波形略有畸变，脉冲宽度略微变小。

利用仿真软件产生不同重频的超宽带脉冲信号，并将

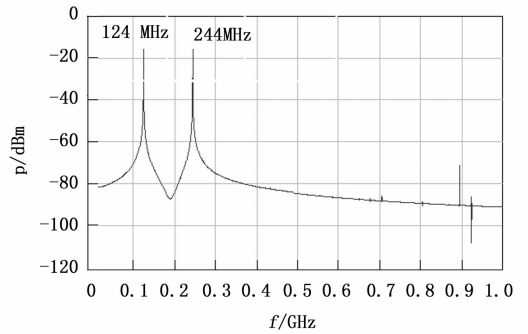
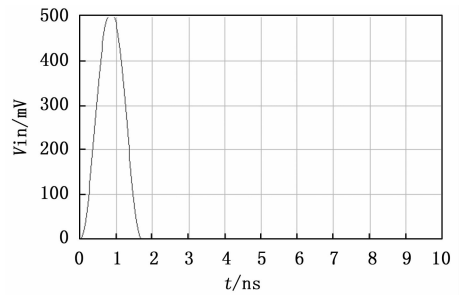
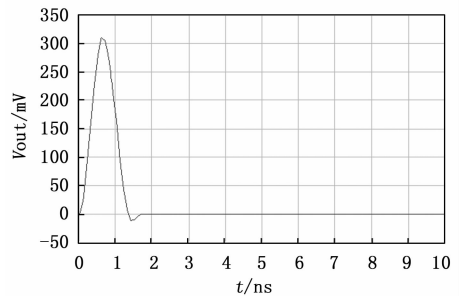


图 2 通信信号注入时混频器输出信号频谱



(a) 输入信号波形



(b) 混频器输出信号波形

图 3 单脉冲超宽带信号注入混频器

不同重频的超宽带脉冲信号注入混频器，观察混频器输出。图 4 给出了 0.5 MHz、5 MHz、10 MHz 重频条件下超宽带脉冲注入时混频器的输出波形。通过对图 4 的波形形式分析，可知，当重频超宽带脉冲信号注入混频器时，混频器输出波形可认为是以重频超宽带脉冲信号序列为抽样函数对本振信号进行时域采样，其波形包络形式因重频的不同而不同。

2.2 重频超宽带脉冲信号干扰混频器仿真

重频超宽带脉冲信号作为干扰信号与正常通信信号一起注入混频器，观察混频器输出。此时 RF 源频率为 60 MHz，LO 源频率为 184 MHz。图 5 给出了 5 MHz 重频条件下超宽带脉冲信号与正常的通信信号一起注入混频器时混频器输出波形与频谱。由图 5 可知，重频超宽带脉冲作为干扰信号同射频通信信号一起注入混频器时，并不能干扰混频器的正常输出，混频器可实现其变频功能，输出的波形频谱中包含正常的差频（124 MHz）和和频信号（244 MHz）。

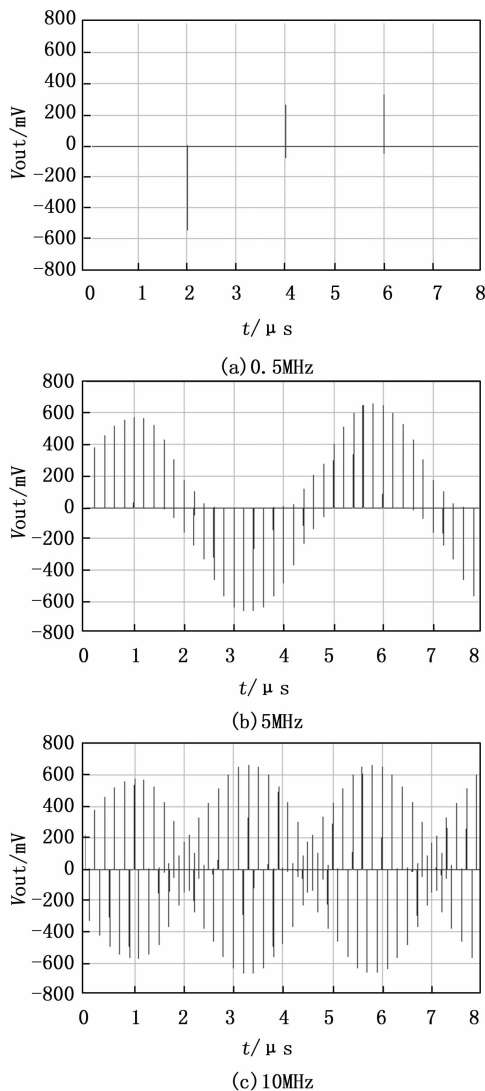


图 4 重频超宽带信号注入时混频器输出波形

变频损耗为衡量混频器工作性能的重要指标, 其表征混频器输出端幅度特征与输入端的关系, 因此, 为分析重频超宽带脉冲信号对混频器工作性能的影响, 仿真给出了变频损耗与重频超宽带脉冲信号参数的变化关系, 即在正常通信信号参数不变 (频率、幅值等) 的情况下, 变频损耗随超宽带脉冲信号的幅值、重频、脉宽的变化关系。调节 PULSE 源参数设置, 仿真给出了混频器变频损耗跟超宽带脉冲信号的幅值、重频及脉宽的变化关系曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知, 当重频超宽带脉冲信号参数发生变化时, 混频器变频损耗在一个较小的范围内变化 (约 0.2 dB), 综合考虑仿真过程中的计算误差和读数误差, 可认为混频器的变频损耗受重频超宽带脉冲信号的影响较小。

通过以上的仿真分析可得到初步结论, 重频超宽带脉冲并不能对混频器的正常工作产生较大影响, 重频超宽带脉冲作为干扰信号随正常通信信号一同注入混频器时, 混频器性能并不受影响, 仍能输出正常的信号, 但由于重频

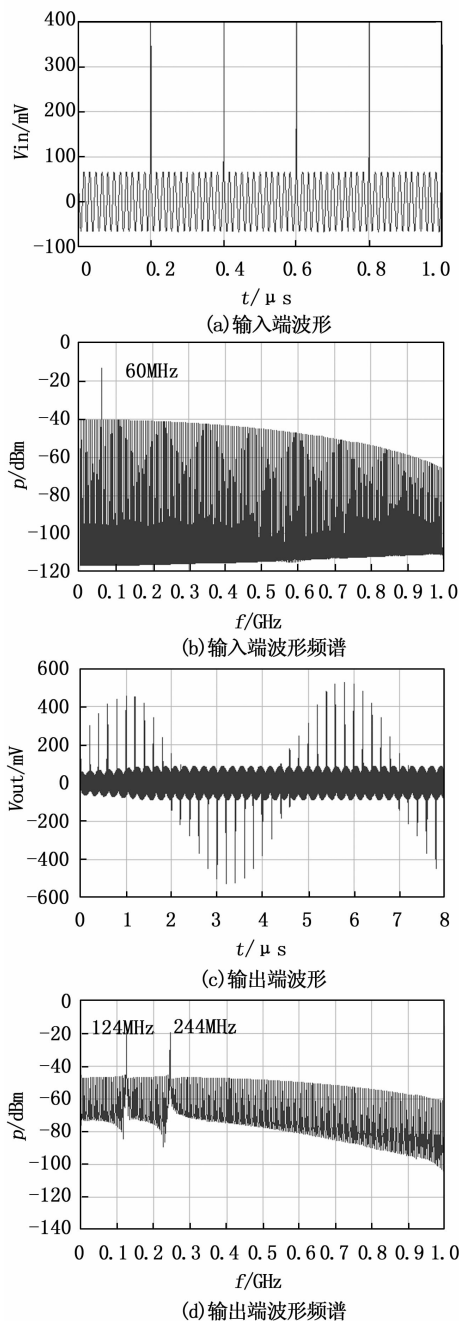


图 5 重频超宽带脉冲信号与通信信号同时注入混频器

超宽带脉冲通过混频器后仍然包含丰富的频谱分量, 其中即包含混频器正常输出的频率成分, 则重频超宽带脉冲信号仍有可能影响混频器后端电路的工作。

3 实验研究

为验证仿真分析结果, 建立图 7 所示的实验系统。采用安捷伦公司的脉冲源 81130A 来产生重频超宽带脉冲信号, 两台安捷伦公司的信号源 8257D 来产生射频通信信号与本振信号。

实验所用混频器为某型通信设备接收机所采用的 ADE-1MH 型混频器, 此型号混频器为无源混频器, 工作带宽为

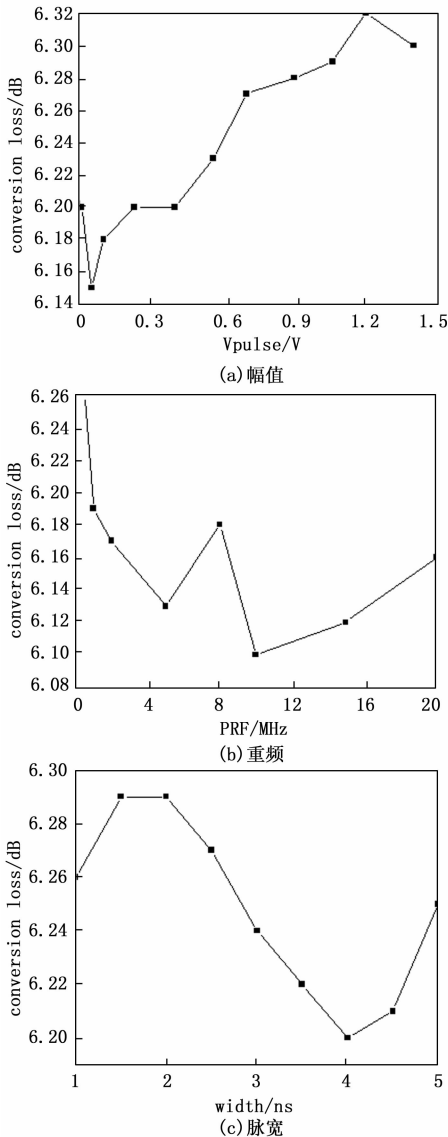


图 6 变频损耗随超宽带脉冲信号参数变化仿真曲线

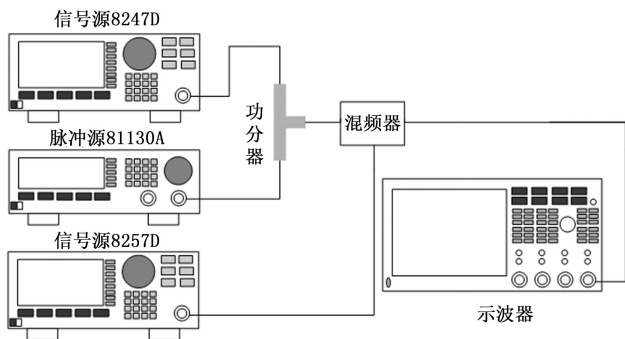


图 7 实验系统

DC—500 MHz，实验标定了其下变频输出 124 MHz 中频信号时的变频损耗，如表 1 所示。由表 1 可知，ADE-1MH 型混频器的变频损耗受本振信号的功率影响较大。在输入正常通信信号频率和功率不变的情况下，本振信号功率越小，变频损耗越大。

表 1 ADE-1MH 型混频器变频损耗测试

射频信号		本振信号		中频信号	变频损耗/ dB
频率/ MHz	功率/ dBm	频率/ MHz	功率/ dBm	频率/ MHz	
30	-5	154.8	13	124.8	6.4
40	-5	164.8	13	124.8	6.8
50	-5	174.8	13	124.8	7.2
60	-5	184.8	13	124.8	6.2
70	-5	194.8	13	124.8	6.4
80	-5	204.8	13	124.8	6.8
30	-5	154.8	10	124.8	7.2
40	-5	164.8	10	124.8	6.8
50	-5	174.8	10	124.8	7.6
60	-5	184.8	10	124.8	6.8
70	-5	194.8	10	124.8	6.8
80	-5	204.8	10	124.8	6.4
30	-5	154.8	5	124.8	8.4
40	-5	164.8	5	124.8	7.2
50	-5	174.8	5	124.8	8.8
60	-5	184.8	5	124.8	9.2
70	-5	194.8	5	124.8	10
80	-5	204.8	5	124.8	8.8
30	-10	154.8	13	124.8	6.4
40	-10	164.8	13	124.8	6.7
50	-10	174.8	13	124.8	7.2
60	-10	184.8	13	124.8	6.2
70	-10	194.8	13	124.8	6.6
80	-10	204.8	13	124.8	6.8

在以下的实验研究中，固定两台信号源 8257D 的设置，设置如下：产生射频通信信号的信号源频率设置为 60 MHz，输出功率设置为 -7 dBm，经功分器与重频超宽带脉冲信号合路后，其功率应为 -10 dBm；产生本振信号的信号源频率设置为 184 MHz，输出功率为 13 dBm。此种条件下，对应的混频器变频损耗约为 6.2 dB。

3.1 混频器对超宽带脉冲信号的响应实验

实验测量了只有超宽带脉冲信号注入混频器时混频器输出波形。对于单脉冲超宽带脉冲信号，混频器输出波形较原始波形稍有畸变，幅值变小。对于重频超宽带脉冲信号，对比图 8 与图 3，实验测量得到的波形形式基本与仿真分析得到波形一致。

图 9 给出了不同重频条件下超宽带脉冲信号注入后混频器输出实测波形。对比图 9 和图 4 可知，仿真得到的波形与实测波形基本一致。

3.2 重频超宽带脉冲信号对混频器的干扰实验

重频超宽带脉冲信号作为干扰信号与正常通信信号一起注入混频器，图 10 给出了重频为 5 MHz 的超宽带脉冲信号与正常通信信号一起注入混频器后波形和频谱，此时 RF 源频率为 60 MHz，LO 源频率为 184 MHz。

比较图 5 与图 10，实验测量波形与仿真得到波形基本一致。由于实验所用混频器的非线性，其输出波形频谱中除了差

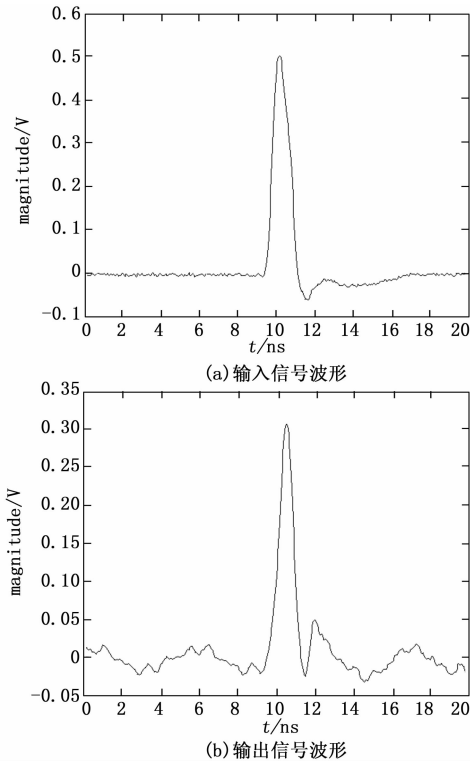


图 8 单脉冲超宽带信号注入后混频器输出实测波形

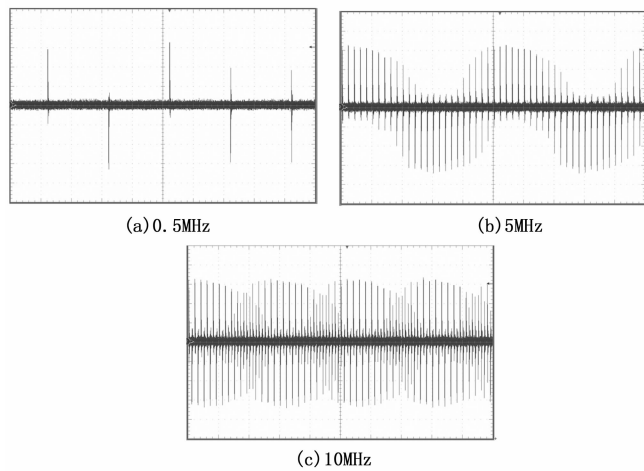


图 9 不同重频超宽带脉冲信号注入后混频器输出实测波形

频信号和和频信号外, 还包含了一些幅度较高的谐波分量, 而仿真所用的混频器为理想模型, 混频器的非线性特征没有得到表征。

实验测量给出了混频器变频损耗随超宽带脉冲信号参数变化曲线。由图 11 可知, 随着重频超宽带脉冲信号的注入, 混频器变频损耗略有改变, 其变化范围小于 1 dB。因超宽带脉冲信号注入后混频器输出波形为包络形式, 考虑此种实验模式下存在的读数误差, 可认为变频损耗受重频超宽带脉冲信号影响较小。

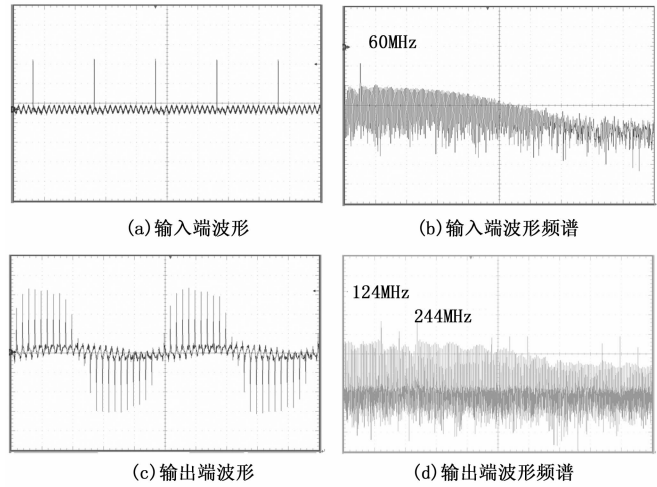


图 10 重频超宽带脉冲信号与通信信号同时注入混频器实测波形

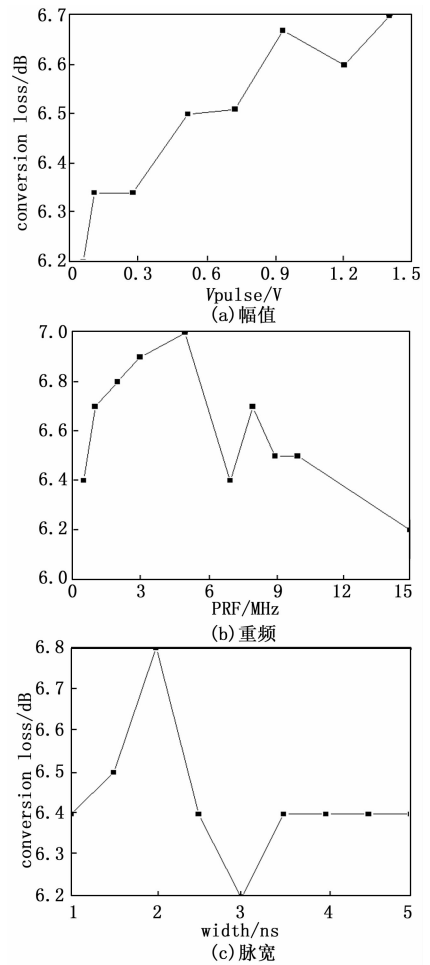


图 11 变频损耗随超宽带脉冲信号参数变化实测曲线

4 扩展性分析

由仿真分析结果和实验结果可知, 重频超宽带脉冲信号并不影响单一混频器的正常工作, 其作为干扰信号可正常通过混频器, 且通过混频器后仍包含丰富的频率成分。

另外，混频器一般同滤波器一起组成混频滤波电路，并且当前的通信设备接收机多采用超外差结构，一般包含多级混频滤波电路来降低混频滤波后的中频信号频率以方便后续电路的处理。综合考虑多级混频滤波电路，针对某型通信设备的接收机射频前端两级混频滤波电路进行了重频超宽带脉冲响应初步实验研究，混频滤波电路结构形式如图 12 所示。

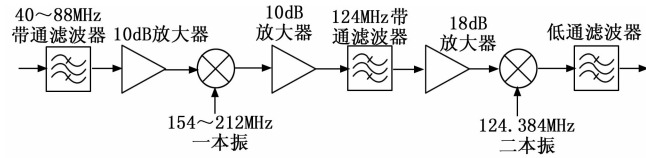


图 12 混频滤波电路结构示意图

在图 12 所示的电路结构中，40~88 MHz 频率范围内的通信信号经一级混频滤波电路后变为 124 MHz 的中频信号，其经过二级混频滤波电路后变为频率为 384 kHz 的中频信号。将不同参数条件下的重频超宽带脉冲信号注入混频滤波电路，观察混频滤波电路的输出。

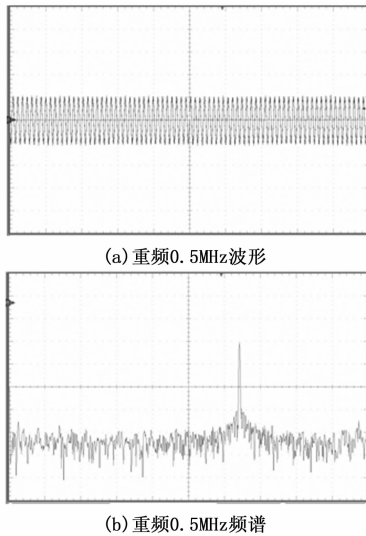


图 13 混频滤波电路输出波形与频谱

文献 [8] 指出重频超宽带脉冲的频谱呈离散谱线分布，谱线间隔为重复频率，且脉冲的功率主要集中在重频整数倍处的离散谱线上。因此，混频滤波电路对重频超宽带脉冲的响应依赖于图 12 所示的 40~88 MHz 带通滤波器。若超宽带脉冲的主频能够覆盖这一频带（40~88 MHz），且重频整数倍处的离散谱线能够落入这一频带，则混频滤波电路可输出频率为 384 kHz 的信号。图 13 与表 2 给出了图 12 所示的两级混频滤波电路对重频超宽带脉冲的响应特性。在一定的参数条件下，重频超宽带脉冲经过混频滤波电路后可变为连续波信号，频率同通信信号经过混频滤波电路后输出的中频信号频率相同。因此，重频超宽带脉冲对混频滤波电路的干扰以及之后电路的干扰类似定频连续波信号干扰。

表 2 两级混频滤波电路响应特性

序号	输入参数			输出参数	
	重频/ MHz	脉宽/ ns	幅值/ V	输出频率 /kHz	输出功率 /dBm
1	0.51	2.1	384	-24	
2	5	1	2.1	384	-8
3	5	2	2.1	384	-7
4	5	1	1.4	384	-10.5
5	1	1	1	384	-24
6	3	1	1	384	-24
8	7	1	1	384	-23.6
9	10	1	1	384	-23.9
10	13	1	1	384	-23.7
11	15	1	1	384	-23.7
12	18	1	1	384	-23.4
13	20	1	1	384	-24.8

5 结论

通过仿真分析与实验研究，针对超宽带脉冲信号干扰混频器，可得如下结论：

1) 对于单脉冲超宽带信号，混频器输出同波形形式的信号，幅值减小，波形会产生一定程度的畸变。对重频超宽带脉冲信号，混频器输出波形可认为以重频超宽带脉冲信号序列为抽样函数对本振信号进行时域采样，其波形包络形式因重频的不同而不同。

2) 作为干扰信号，重频超宽带脉冲信号并不能影响混频器正常工作。当重频超宽带脉冲信号与射频通信信号一起注入混频器时，混频器可实现其正常变频功能，其输出中频信号虽有所变化，但因其变化范围不大，作为衡量混频器工作性能的重要指标—变频损耗认为基本不变。

3) 重频超宽带脉冲经过混频滤波电路后变为同中频信号同频的连续波信号，对混频滤波电路的干扰以及之后电路的干扰类似定频连续波信号干扰。

参考文献：

[1] 杨 猛, 宁 辉, 张永栋, 等. 重频超宽带脉冲干扰低噪声放大器 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27 (8): 119 - 123.

[2] 黄裕年, 任国光. 高功率超宽带电磁脉冲技术 [J]. 微波学报, 2002, 18 (4).

[3] Agree F J, Prather W D, Baum C E, et al. Ultra-wideband transmitter research [J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1998, 26 (3): 860 - 873.

[4] 陆 巍, 陈志刚, 张现福, 等. 高功率超宽带脉冲产生实验 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23 (11): 2929 - 2932.

[5] 李 刚, 毕军建, 刘尚合, 等. 超宽谱电磁脉冲对无线电引信的耦合及防护加固 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18 (8): 1332 - 1336.

- [6] 张勇强, 魏光辉, 安 霆. 超宽带辐照对飞行器干扰效应实验研究 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2010, 31 (6): 636-640.
- [7] 耿利飞, 魏光辉, 潘晓东, 等. 某型通信电台超宽带辐照效应 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23 (12): 3358-3362.
- [8] 张智香, 刘小龙, 陈 锦, 等. 高重频超宽谱短电磁脉冲对 GPS 接收机干扰 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26

(3): 033006.

- [9] 李用兵, 王海龙. 电磁脉冲对 GaAs LNA 损伤及其分析 [J]. 半导体技术, 2008, 33 (10): 899-901.
- [10] 杨 洁, 刘尚合, 原青云, 等. 微波低噪声硅晶体管的方波电磁脉冲损伤研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (7): 111-114.
- [11] 奚 望. 集成小型化混频器的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

(上接第 294 页)

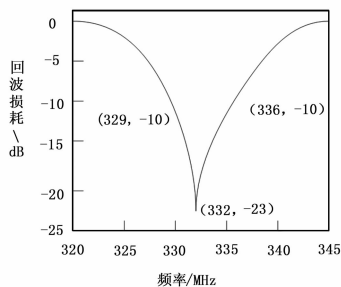


图 6 回波损耗

频率为 332 MHz 的时候, 该点的回波损耗为 -23 dB, 在 331.5~334.9 MHz 的有效范围内, 回波损耗小于 -10 dB, 满足通信行业的标准。

2.3 驻波比结果与分析

天线结构谐振频率选取的范围为 320~345 MHz, 驻波比仿真实验结果如图 7 所示。

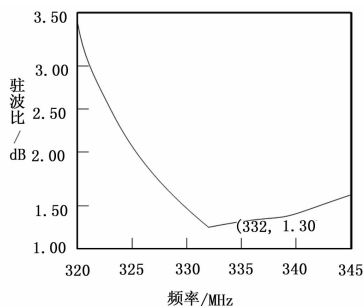


图 7 驻波比

由图 7 可知: 当谐振频率为 320~332 MHz 的范围内曲线图呈现下降趋势, 驻波比从 3.40 dB 下将到 1.30 dB; 当谐振频率为 332~345 MHz 的范围内曲线图呈现上升趋势, 但是比较缓慢, 驻波比从 1.30 dB 上升到 1.70 dB。由此可以看出, 当谐振频率为 332 MHz 的时候, 该点的驻波比为 1.30 dB, 在 331.5~334.9 MHz 的有效范围内, 驻波比小于 1.50 dB, 满足通信行业的标准。

2.4 实验结论

由上述的实验过程可以得出结论: 在 328~340 MHz 的有效范围内, 驻波比小于 1.70 dB; 在 331.5~334.9 MHz 的有效范围内, 驻波比小于 1.50 dB; 在 330~332

MHz 的有效范围内, 驻波比小于 1.30 dB, 在 331.5~334.9 MHz 的有效范围内, 回波损耗小于 -10 dB。在该范围内能够有效的避免瞬间过高电压导致射频末端的损坏, 能够满足通信的基本要求, 增加了偶极子臂的粗度, 提高了安全性, 大大减小了天线走线所占用的空间, 增强了增益的特性。

3 结束语

在多应用环境下利用微带巴伦的电磁耦合机理, 通过融合螺旋天线的结构特点对微带偶极子天线进行设计与优化, 能够实现电磁波在微带线间的合理耦合, 对于未来的微带偶极子天线的设计与优化具有一定的参考价值, 并且充分满足通信行业的基本标准。

参考文献:

- [1] 汪大军, 王彦虎, 廖永波. 新型电磁材料微带天线的综述 [J]. 电子技术应用, 2015, 41 (12): 11-14.
- [2] 杨 磊, 翁子彬, 王 星, 等. 双频宽带双极化定向电磁偶极子天线设计 [J]. 微波学报, 2017, 33 (1): 41-44.
- [3] 石一平, 易超龙, 樊亚军, 等. 一种高功率共面馈电脉冲辐射天线的设计实验 [J]. 强激光与粒子束, 2016, 28 (4): 41-44.
- [4] 何小煜, 俞钰峰, 张则涛. 一种用于频谱监测的宽带宽波束印刷偶极子天线 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (17): 164-166.
- [5] 张 民, 瞿培华, 阳 松. 演化算法在微带天线优化中的应用 [J]. 电波科学学报, 2014, 29 (3): 10-13.
- [6] 薛 飞, 王宏建, 易 敏, 等. 新型微带反射阵单元的设计及其应用 [J]. 电波科学学报, 2015, 30 (3): 8-12.
- [7] 李仁凯, 田雨波, 伍瑞新, 等. 粒子群算法在三维微带阵列优化设计中的应用 [J]. 微波学报, 2015, 31 (1): 44-49.
- [8] 于 涛, 尹成友, 戚宗锋, 等. 球面共形微带天线的优化设计 [J]. 微波学报, 2016, 32 (4): 21-26.
- [9] 邢 妍, 陈文新. 全极化微波辐射计天线方向图校正方法研究 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (7): 174-178.
- [10] 黄元君, 楼 平, 吴志军, 等. 新型自适应 RBF 神经网络应用于微带天线建模 [J]. 工程设计学报, 2014 (5): 426-431.