



·高功率微波技术专辑·

## 超宽带脉冲作用下抗干扰器件的特性分析\*

陈圣贤, 胡明, 李永龙, 袁雪林

(中山大学电子与通信工程学院, 广东深圳 518107)

**摘要:** 基于高重频超宽带脉冲, 研究了高重频超宽带脉冲对自适应调零天线和 PIN 限幅器的抗干扰性能的影响。基于 Matlab 和 ADS 仿真软件搭建模型, 并通过实验平台对 ADS 的仿真结果进行验证。实验结果表明: 对于导航接收机中的自适应调零天线, 超宽带干扰脉冲会使其射频链路产生饱和效应, 从而使功率倒置算法失效, 进而无法在干扰方向形成零陷; 对于 PIN 限幅器, 超宽带干扰脉冲可以使其产生明显的尖峰泄露效应。相较于 ns 量级的窄谱高功率微波脉冲, 超宽带脉冲对限幅器的干扰能力更强。

**关键词:** 超宽带电磁脉冲; 自适应调零天线; PIN 限幅器; 尖峰泄露; 饱和效应

中图分类号: TN972

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230312

## Characteristic analysis of anti-jamming device under ultra-wide bandwidth pulse

Chen Shengxian, Hu Ming, Li Yonglong, Yuan Xuelin

(School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

**Abstract:** With the continuous development of anti-jamming devices, the jamming effect of interference pulses for RF links is more and more limited. Ultra-wideband electromagnetic pulse has become a new type of interference means with its own wide spectrum and steep rising edge characteristics. Based on the high re-frequency ultra-wideband pulse, this paper investigates the effect of high re-frequency ultra-wideband pulse on the anti-jamming performance of adaptive zeroing antenna and PIN limiter. The model is built based on Matlab and ADS simulation software, and the simulation results of ADS are verified by the experimental platform. The experimental results show that: for the adaptive zeroing antenna in the navigation receiver, the UWB interference pulse can cause saturation effect on its RF link, which makes the power-inversion algorithm invalid, and then zero-trapping can not form in the direction of the interference; for the PIN limiter, the UWB interference pulse can cause an obvious spike leakage effect. Compared to narrow-spectrum high-power microwave pulses on the nanosecond scale, UWB pulses are more capable of interfering with limiters.

**Key words:** ultra-wideband electromagnetic pulse, adaptive zero tuning antenna, PIN limiter, peak leakage, saturation effect

随着电子设备小型化、集成化、高速化的需求提升, 其系统内部的电磁敏感度变得越来越高<sup>[1]</sup>。为了能有效抵抗自然噪声和人为噪声, 电子设备的抗干扰手段不断升级和革新。尤其是在雷达<sup>[2]</sup>、通信、导航等领域内, 抗干扰措施更是被广泛使用<sup>[3-5]</sup>。作为常见的前端抗干扰措施, 限幅器和自适应调零天线对窄谱高功率微波能表现出较强的抑制作用。高重频超宽带脉冲是一种特殊的无载波、高重频、超宽带的脉冲信号, 其极短的时域持续时间使得它具有极宽的频谱, 可以覆盖大部分电子设备的工作频段<sup>[6-7]</sup>。同时, 亚 ns 级的上升沿使其在面对限幅器和自适应调零天线时能表现出更好的干扰效果。研究高重频超宽带脉冲对于限幅器和自适应调零天线的影响, 对于提升干扰射频前端电路的效果有重要意义。

\* 收稿日期: 2023-09-14; 修订日期: 2023-11-13

基金项目: 中国电波传播研究所稳定支持项目(A132301215)

联系方式: 陈圣贤, chenshx75@mail2.sysu.edu.cn。

通信作者: 袁雪林, yuanxlin3@mail.sysu.edu.cn。

限幅器作为射频前端电路抗干扰的第一道防线,可以极大程度地降低干扰信号的峰值电压。目前,针对 PIN 限幅器的干扰效应研究主要集中于以下几个方面:(1)建立 PIN 二极管缺陷物理模型,并对其进行有限元分析,讨论脉冲重复频率和二极管的损伤之间的关系<sup>[8]</sup>; (2)强电磁脉冲作用下限幅器的响应特性<sup>[9-10]</sup>; (3)通过 ADS 仿真软件,分析限幅器的尖峰泄露效应<sup>[11]</sup>。现有的限幅器干扰测试研究所用的窄谱高功率微波脉冲上升沿多为几 ns,远大于 PIN 限幅器的响应时间,导致干扰效果不佳。本文以陡上升沿、宽频谱的高重频超宽带脉冲为干扰源,分析在面向自适应调零天线和 PIN 限幅器时 UWB 脉冲的干扰效果。通过仿真和实验,验证了相较于传统干扰源,UWB 脉冲对自适应调零天线和限幅器有更显著的干扰效果。

### 1 UWB 脉冲对于自适应调零天线的影响

为提高导航接收机在复杂电磁环境中的工作能力,将自适应调零天线作为接收天线是常用且有效的抗干扰措施<sup>[12-14]</sup>。自适应天线通过控制天线阵中各阵元的增益和相位,使系统的方向图在干扰方向形成零陷,实现抑制干扰的功能。功率倒置算法利用自适应天线阵接收信号,依赖某种功率最优的原则,在强信号对应的来波方向形成零陷,从而实现空域过滤强信号的抗干扰处理。

当信号被天线阵接收后,各个天线阵元都可以调整相应的权值系数,则阵列的输出信号可表示为

$$y(n) = \mathbf{W}^H \mathbf{X} \tag{1}$$

式中:  $\mathbf{W} = [w_1, w_2, w_3, w_4, \dots, w_N]^T$  为阵列的加权矢量,  $\mathbf{X} = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t), \dots, x_N(t)]^T$  为天线阵收到的信号矢量,  $H$  为共轭转置符号。

根据线性约束最小方差准则,约束条件为

$$\mathbf{W}^H \mathbf{S} = 1 \tag{2}$$

式中:  $\mathbf{S}$  为导向矢量,一般情况下  $\mathbf{S} = [1, 0, 0, 0, \dots, 0]^T$ 。故功率倒置算法是固定一路权值为 1 的前提下,调整其余路的权值使得系统输出的功率达到最小。其物理意义为:方向图在干扰的来波方向将形成零陷,并且干扰信号的功率越强,零陷则越深。公式可表达为

$$\begin{aligned} & \min_w E\{|\mathbf{Y}|^2\} \\ & s.t. \mathbf{W}^H \mathbf{S} = 1, \mathbf{S} = [1, 0, 0, \dots, 0]^T \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)构建拉格朗日函数

$$\mathbf{L}(w) = \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W} + \lambda (\mathbf{W}^H \mathbf{S} - 1) \tag{4}$$

式中:  $\lambda$  为拉格朗日乘子,  $\mathbf{R}_{xx}$  为输入信号的自相关矩阵。再令其梯度为零,即

$$\nabla(w) \mathbf{L}(w) = 0 \tag{5}$$

可以解得最佳权矢量

$$\mathbf{W}_{opt} = \lambda \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{S} \tag{6}$$

结合约束条件可得

$$\mathbf{W}_{opt} = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{S}}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{S}} \tag{7}$$

图 1 为自适应调零天线的结构框图。自适应调零阵列天线主要由阵列天线、多通道射频单元和抗干扰处理单元组成,天线阵元收到卫星信号后,经过低噪放单元放大送到射频单元,将多路卫星导航射频信号下变频为中频信号<sup>[15-16]</sup>。各路中频信号经过 ADC 转换成数字信号,送到抗干扰处理单元实现干扰抑制和信号还原。干扰抑制后的数字信号经过 DAC 变为模拟中频信号并输出给导航接收机单元进行处理<sup>[17]</sup>。

本文以五元环阵列天线结构为基础,基于 Matlab 仿真研

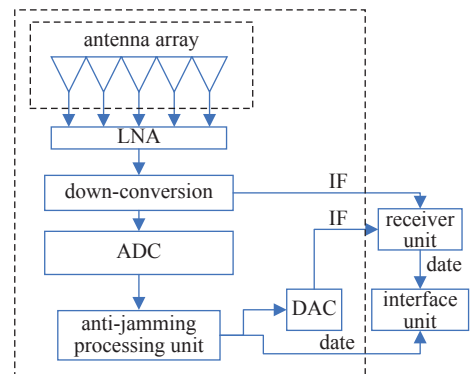


Fig. 1 Block diagram of the structure of the adaptive nulling antenna

图 1 适应调零天线的结构框图

究功率倒置算法在超宽带电磁脉冲造成饱和效应的条件下的抗干扰能力。在系统工作图在正常状况下, 输入干扰和导航信号, 干扰的来波方位角和仰角为 $(60^\circ, 20^\circ)$ , 导航信号的来波方位角和仰角为 $(20^\circ, 50^\circ)$ 。

当干扰信号为窄谱干扰脉冲, 干信比为 30 dB 时, 功率倒置算法对其的零陷结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 功率倒置算法可以使阵列天线的方向图在干扰的来向形成零陷, 从而达到抑制干扰的效果。当 UWB 脉冲从天线阵列进入射频链路后, 使得导航接收机射频前端电路的低噪放等敏感器件产生饱和效应。各个通道所输出的信号都是器件饱和后输出的信号, 所有信号都无法得到有效的放大, 受到完全的压制<sup>[18]</sup>。接下来在不改变导航信号和干扰信号的来波方向的条件, 采用脉宽为 1 ns, 重频为 5 kHz, 干信比为 30 dB 的 UWB 脉冲, 模拟经过饱和效应后的信号进行仿真。

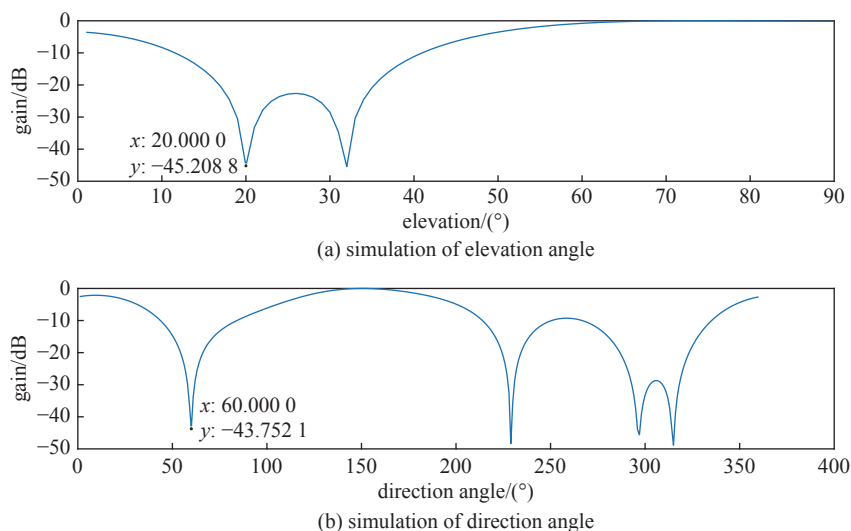


Fig. 2 Results of power inversion anti-jamming

图 2 功率倒置抗干扰结果图

任意选取了 3 次实验结果如图 3 所示, 所得的结果不完全相符, 均没有在干扰的方向形成零陷。在自适应调零天线射频链路产生饱和效应之后, 器件丧失对导航信号的放大能力, 信号无法放大。到达抗干扰处理单元的各端口信号都是饱和后处理的信号, 从中无法识别出有用信号。导致信号完全被压制, 最终使功率倒置算法失效。

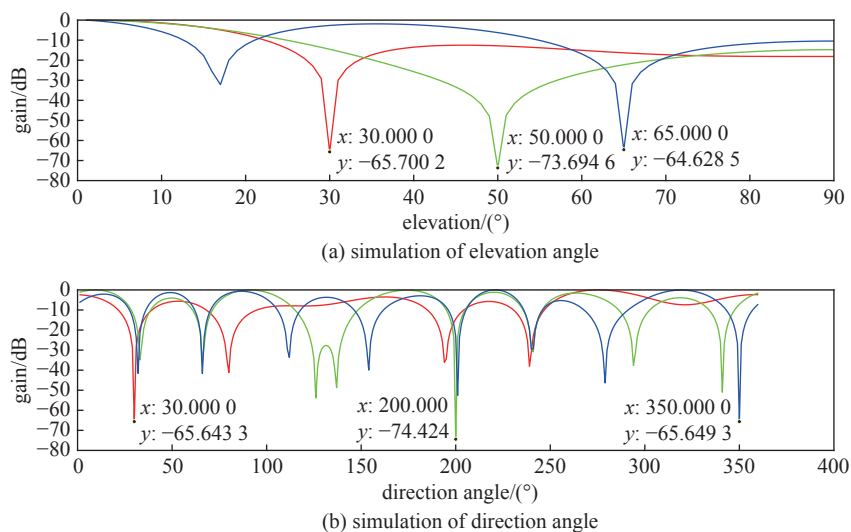


Fig. 3 Multiple simulation of the power inversion algorithm under saturation effect

图 3 饱和效应下的多次功率倒置算法仿真

## 2 基于 ADS 的 PIN 限幅器尖峰泄露效应分析

限幅器作为射频前端的重要器件, 可以保护后续敏感电路不被大功率干扰信号造成器件损伤, 其工作原理可以等效为受输入信号的功率值控制的可变阻抗。限幅器中常用的阻抗变化限幅器件有肖特基检波二极管、PIN 二

极管等。PIN 限幅器因具有响应时间短、插入损耗小、可承受功率大等优点被广泛使用。

限幅器的指标主要有 3 个: 起限阈值功率、功率容量和响应时间, 三者相互制约。一个限幅器的设计往往是偏重考虑它的插入损耗、限阈值功率、功率容量, 追求功率容量的提高会导致限幅器响应时间的增加, 进而会导致限幅器更易产生尖峰泄露。限幅器的尖峰泄露指的是 PIN 二极管在 I 层载流子浓度达到稳定水平之前处于高阻状态, 对大功率微波信号限幅作用很弱, 它是导致限幅器自身和后续敏感器件受损的最主要原因。造成尖峰泄露最主要的因素是干扰脉冲上升时间短, PIN 二极管响应时间慢。当信号的上升时间小于限幅器的响应时间, 尖峰泄露效应使限幅器的限幅作用大幅度削弱。UWB 脉冲的上升沿可达 ps 量级, 相较于上升沿为 ns 量级窄谱干扰脉冲, 限幅器对 UWB 脉冲的限幅效果将大大减弱。

通过 ADS 仿真软件, 构建了 PIN 限幅器的基本模型, 如图 4 所示。模型中将三级 PIN 二极管级联, 各级之间加入微带线过渡。通过对仿真模型中的参数进行调节, 最终使电路指标接近实物实验的指标参数, 仿真模型的频谱特性如图 5 所示。

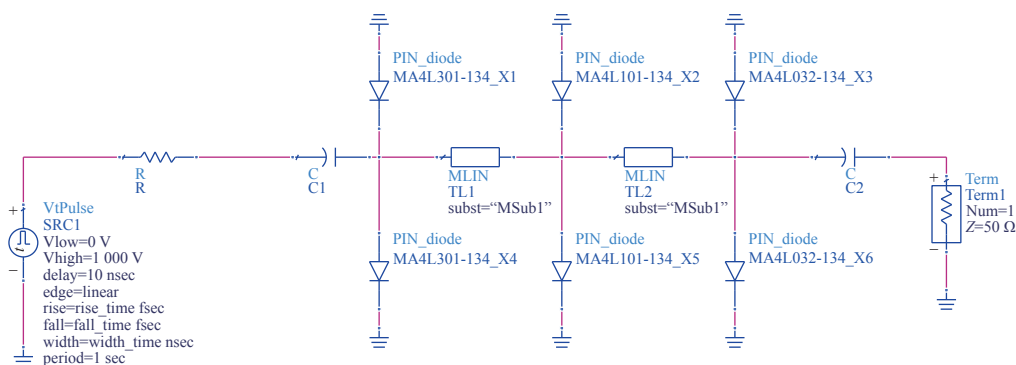


Fig. 4 Experimental circuit diagram of PIN limiter

图 4 PIN 限幅器电路实验图

仿真实验中限幅器的响应时间约为 5 ns, 所设计的限幅器在正常状态下工作, 对小信号的作用是等比例放大, 结果如图 6 所示。由图 6 仿真结果可以看出, 限幅器对小信号的增益为 0.5, 波形没有发生变化。

对于窄谱高功率微波脉冲而言, 其上升时间一般为几 ns, 峰值电压可达到 1 kV 以上。为测试 PIN 限幅器对其的作用效果, 将仿真实验中的输入波形换成上升沿时间 10 ns、幅值电压为 1.3 kV 的大脉冲信号。

图 7 为改变输入脉冲后的实验波形图。从图中可以看出, 当输入信号为 1.3 kV 的大脉冲时, 经过 PIN 限幅器后的输出信号被限制在绝对值为 6 V 以下, PIN 限幅器起到了限幅作用, 脉冲幅值被大幅度降低。

将输入信号替换为上升沿为 150 ps 的 UWB 脉冲, 相同条件下再次进行仿真, 得到的波形图如图 8 所示。由图 8

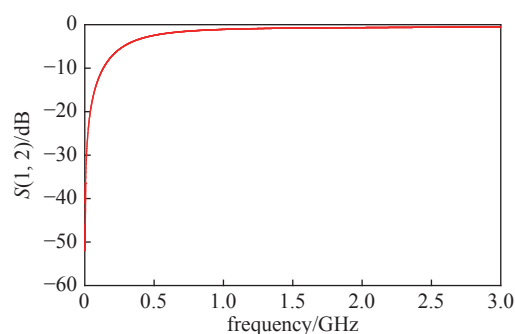
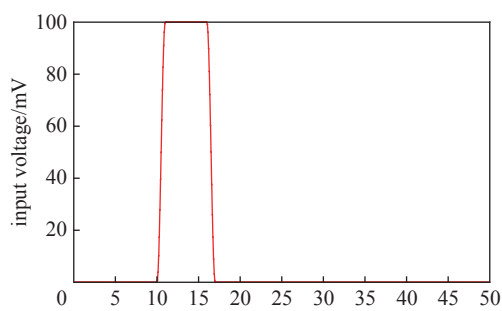
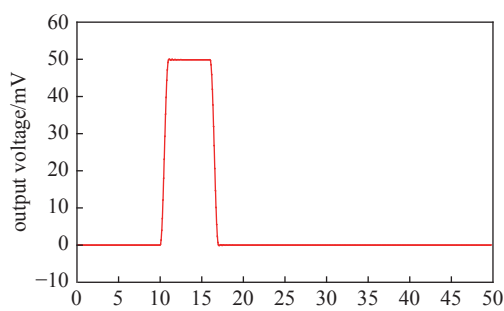


Fig. 5 PIN limiter insertion loss curve

图 5 PIN 限幅器插入损耗曲线



(a) original signal



(b) signal after the limiter

Fig. 6 Effect of limiter on small signals

图 6 限幅器对小信号的影响

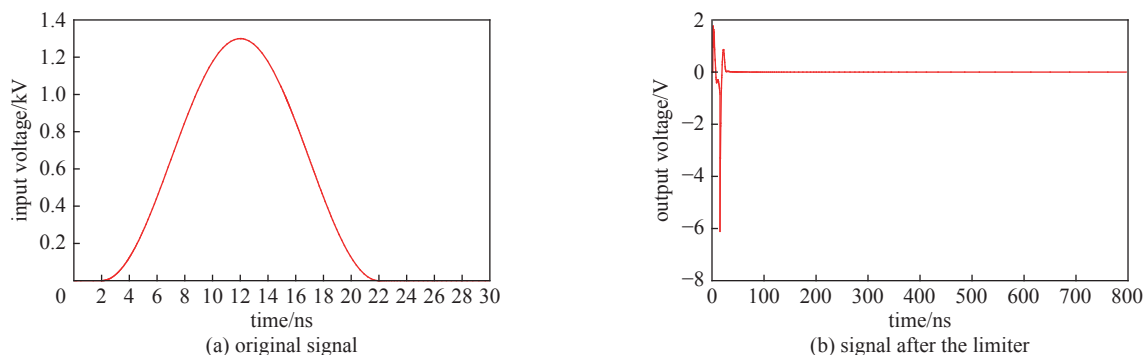


Fig. 7 Experimental waveforms, the pulse rise time is 10 ns for clipping action

图 7 脉冲上升时间为 10 ns 下的限幅作用

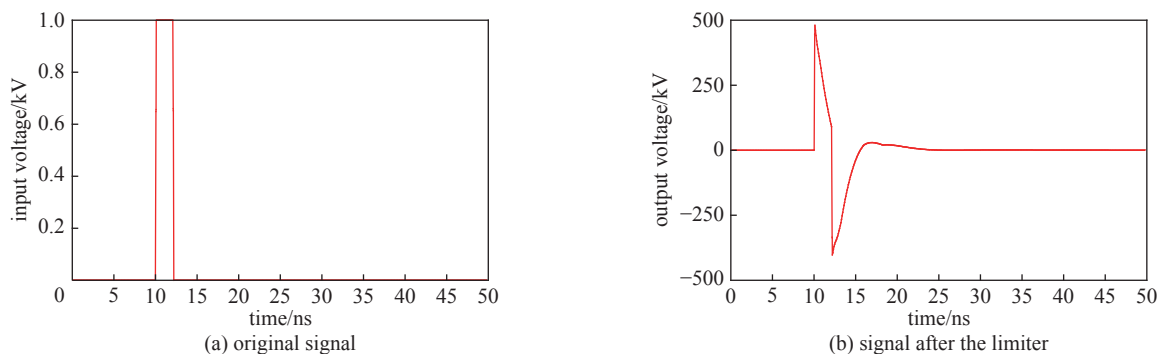


Fig. 8 Simulation waveforms with UWB pulse applied to the limiter

图 8 UWB 脉冲作用于限幅器

的结果可以看出,对于上升时间快的 UWB 脉冲,限幅器响应慢,导致产生尖峰泄露,限幅器漏掉脉冲的幅度大,脉冲忽略限幅作用进入后续电路。

为研究限幅器尖峰泄露对正常工作信号的影响效果,在输入端同时注入 UWB 脉冲和正常工作信号。为方便观察,此处取 1.575 GHz、幅值为 300 mV 的正弦波信号代替 GPS 单载波信号,得到结果如图 9 所示。可以看出, UWB 脉冲造成的尖峰泄露会对正常信号产生一定时间的压制作用,压制时间随着脉冲幅值的增大而增加。

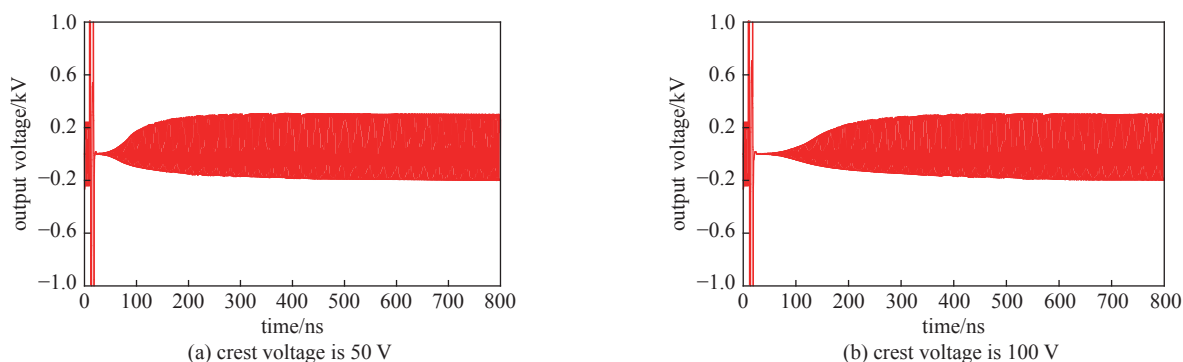


Fig. 9 Diagram of combined injection result

图 9 合路注入结果图

通过脉冲注入实验平台,对上述仿真结果进行验证。实验采用 UWB 脉冲干扰源对 PIN 限幅器进行脉冲注入实验,实验流程图和脉冲注入实验平台如图 10 和图 11 所示。流程图中的 UWB 脉冲干扰源为自研的脉冲干扰源,可产生重频大于 50 kHz、脉宽 1 ns、边沿小于 150 ps 的 UWB 脉冲。PIN 限幅器内置 3 级 PIN 限幅二极管,限幅功

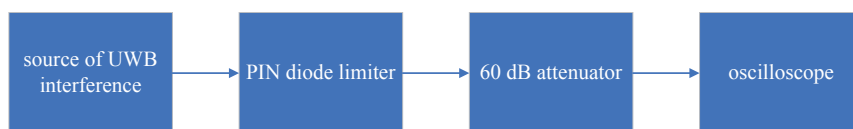


Fig. 10 Flow chart of the experiment

图 10 实验流程图

率为 0 dBm, 其插入损耗曲线如图 12 所示。60 dB 的衰减器可以在不改变信号波形的情况下保证限幅之后的脉冲不会击毁示波器, 便于对实验结果进行观察。

实验中, 信号发生器作为模拟信号源, 用于产生频率为 5 kHz、峰值电压为 2V 的正弦波模拟正常的大信号, 并注入 PIN 限幅器。将经过 PIN 限幅器后的波形数据导出处理后, 得到注入前和注入后的波形如图 13 所示。可以看出, 当输入信号为正常的大信号时, 输出信号的电压峰值被很明显地限制。

为了与后续实验形成对比, 将频率为 100 MHz、幅值为 110 V 的正弦波代替窄谱高功率微波脉冲注入 PIN 限幅器, 将实验结果经过 20 dB 衰减后由示波器记录并导出, 实验结果如图 14 所示。图 14(a) 为经过 20 dB 衰减后的窄谱高功率脉冲, 其上升沿可以等效为 10 ns, 图 14(b) 为经过限幅器后衰减 40 dB 的波形, 可以看出 PIN 限幅器将信号压制了 42.76 dB。

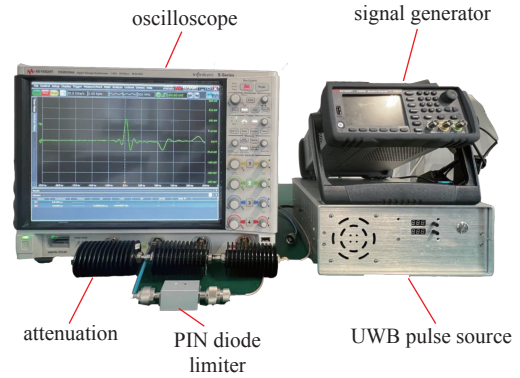


Fig. 11 Pulse injection experimental platform

图 11 脉冲注入实验平台

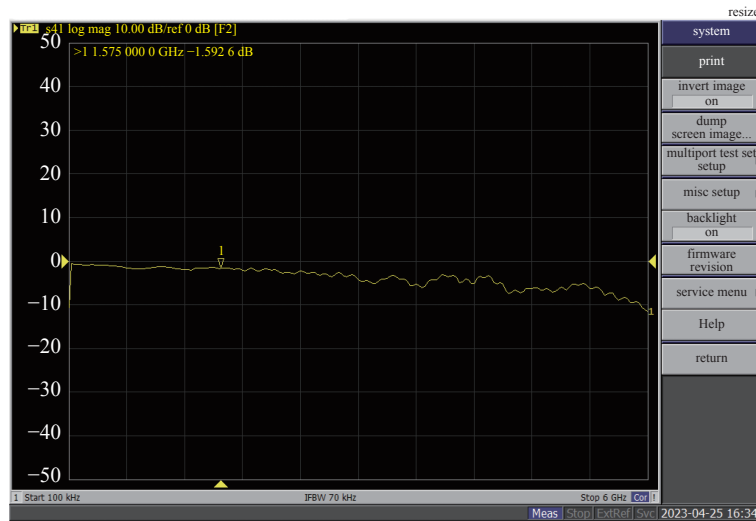


Fig. 12 Limiter insertion loss curve

图 12 限幅器插入损耗曲线

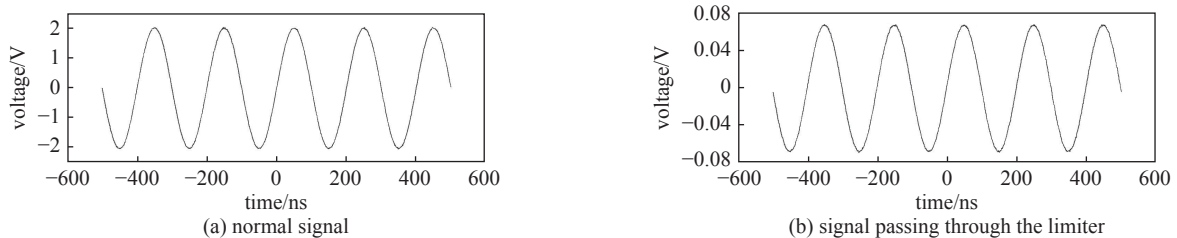


Fig. 13 The analog signal in the normal state and the analog signal after passing through the PIN limiter

图 13 正常状态下的模拟信号和经过 PIN 限幅器后的模拟信号

将输入信号源替换可产生重频 5 kHz、脉宽为 1ns、峰值电压为 1600 V 的 UWB 脉冲源, 并对其所产生的 UWB 脉冲分别进行 0 dB, 14 dB 和 20 dB 衰减后分 3 次注入 PIN 限幅器。为了便于测量, 对于 UWB 脉冲源的原始脉冲以及经限幅器作用后的输出波形, 分别进行了不同程度的衰减。这些经过衰减处理的波形由示波器记录, 并在图 15 中进行呈现。其中, 图 15(a) 展示了经过 60 dB 衰减处理的单个初始 UWB 脉冲波形。图 15(b) 为经 0dB 衰减的 UWB 脉冲作用于限幅器后, 通过 40 dB 衰减器的单个输出波形图。相较于正常情况下的峰值电压, 作用于限幅器后的 UWB 脉冲峰值电压降低了 20.6 dB, 并且在单个周期内有多个震荡尖峰。图 15(c) 为经 14 dB 衰减的 UWB 脉冲作用于限幅器后, 通过 40 dB 衰减器的单个脉冲波形图。图中作用于限幅器后的 UWB 脉冲波形的峰值

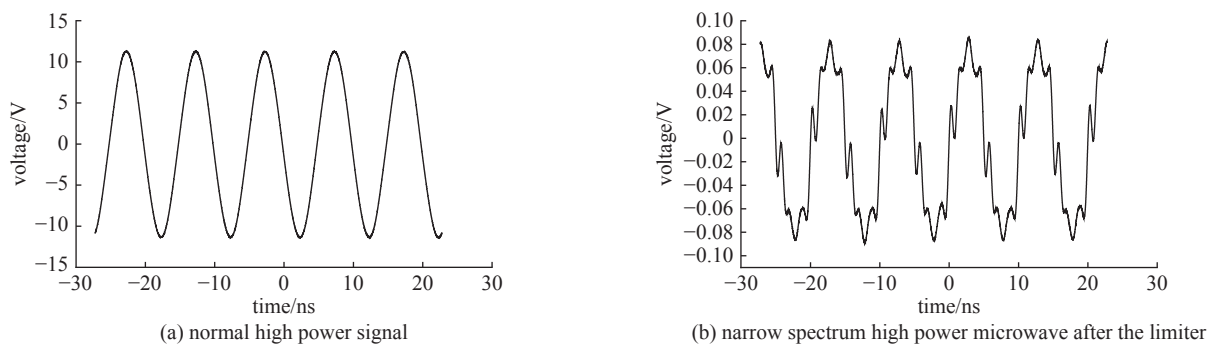


Fig. 14 Narrow-spectrum pulses before and after the limiter

图 14 经过限幅器前后的窄谱脉冲

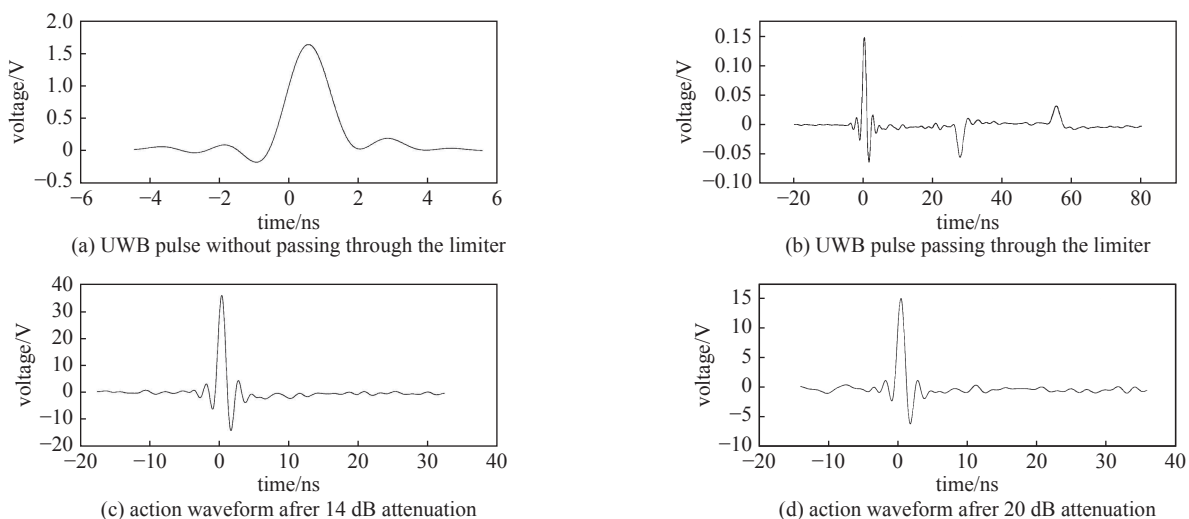


Fig. 15 Input UWB pulses and output waveforms at different amplitudes

图 15 输入的 UWB 脉冲和不同幅值下的输出波形

电压降低了 26.7 dB, 单个周期内的尖峰振荡消失。图 15(d) 为经 20 dB 衰减的 UWB 脉冲作用于限幅器后, 通过 40 dB 衰减器的单个脉冲波形图。图中的峰值电压降低了 20.1 dB。由上述实验结果可以看出, 相较于窄谱干扰脉冲而言, 限幅器对于 UWB 脉冲的压制程度更弱。

为研究脉宽对于限幅器的影响, 将脉冲宽度为 35 ns, 重频 5 kHz, 峰值电压为 1000 V 的 UWB 脉冲注入限幅器, 得到结果如图 16 所示。其中, 图 16(a) 为注入脉冲经过 40 dB 衰减后的波形图, 图 16(b) 为增加脉冲宽度后, 注入的 UWB 脉冲经过限幅器后, 通过 40 dB 衰减器的单个脉冲波形图。从图中可以看出, UWB 脉冲的峰值电压降低了 38.41 dB。相较于窄脉宽的 UWB 脉冲而言, 脉宽的增加会提高 PIN 限幅器对 UWB 脉冲的压制程度。究其原因, 主要在于提高脉冲宽度的同时, 脉冲的上升沿相应也会增加, 进而导致 PIN 限幅器可以在脉冲达到峰值前成功开启, 最终实现限幅功能。

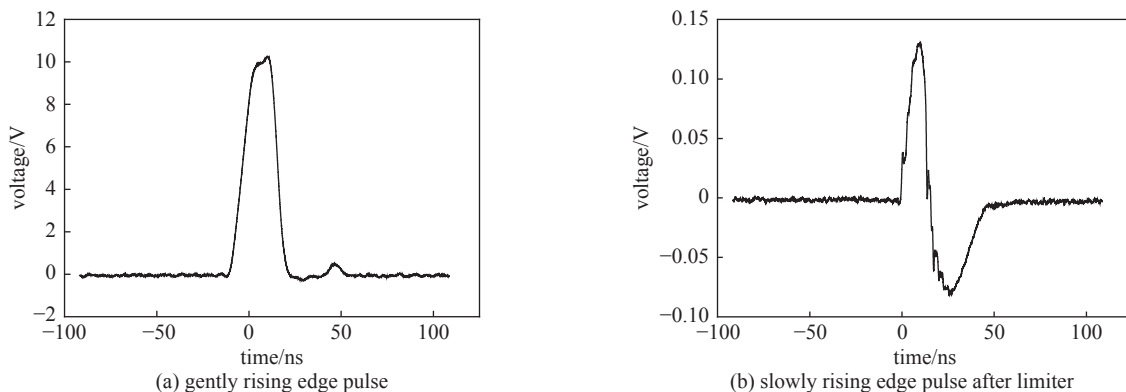


Fig. 16 Pulse before and after increase of rising edge

图 16 增加上升沿后脉冲前后对比图

### 3 结 论

本文主要研究了高重频超宽带脉冲对于自适应调零天线和 PIN 限幅器的作用效果。以导航接收机中的自适应调零天线系统为背景,基于 Matlab 仿真,研究了功率倒置算法在超宽带电磁脉冲造成饱和效应的条件下的抗干扰能力。由于超宽带电磁脉冲可以使射频前端链路产生饱和效应,致使器件丧失对导航信号的放大能力,信号无法放大。多次仿真结果显示,功率倒置算法并不能在干扰方向形成零陷,即 UWB 脉冲不能被其滤除,导致功率导致算法失效。

在对 PIN 限幅器的注入实验中,通过正常小信号的注入实验,验证了 PIN 限幅器对于上升时间较长的信号有很明显的限制作用。通过注入不同幅值下的 UWB 干扰脉冲,并与注入前的 UWB 脉冲进行对比。结果表明:与上升时间较长的信号相比,不同幅值的 UWB 脉冲经过 PIN 限幅器后,由于尖峰泄露效应,UWB 脉冲仍能保持较高的峰值电压,限幅器并不能完全将其限制在极低值。同时,增大脉冲的宽度会大大降低尖峰泄露的程度,极大程度限制了 UWB 脉冲通过限幅器的幅值。

#### 参考文献:

- [1] Zhu Kaichen, Wen Chao, Aljarb A A, et al. The development of integrated circuits based on two-dimensional materials[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(11): 775-785.
- [2] 赵宇姣. 基于高重频超宽带脉冲的雷达干扰技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015. (Zhao Yujiao. Radar interference technology research based on the high repetition frequency ultra-wide-band pulse[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015)
- [3] 崔国龙, 余显祥, 魏文强, 等. 认知智能雷达抗干扰技术综述与展望[J]. *雷达学报*, 2022, 11(6): 974-1002. (Cui Guolong, Yu Xianxiang, Wei Wenqiang, et al. An overview of anti-jamming methods and future works on cognitive intelligent radar[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 974-1002)
- [4] 孙丽英, 陈滨, 董晓晴. 卫星导航信号抗干扰技术应用[J]. *数字技术与应用*, 2022, 40(8): 81-83. (Sun Liying, Chen Bin, Dong Xiaoping. Application of anti-jamming technology of satellite navigation signal[J]. *Digital Technology & Application*, 2022, 40(8): 81-83)
- [5] 张华媛. 卫星通信抗干扰技术研究[J]. *科技创新与应用*, 2022, 12(31): 189-192. (Zhang Huayuan. Research on anti-jamming technology of satellite communication[J]. *Technology Innovation and Application*, 2022, 12(31): 189-192)
- [6] 林琦. 超宽带脉冲信号调制发生功率谱密度的 MatLab 仿真[D]. 上海: 复旦大学, 2008. (Lin Qi. MatLab simulation of generating power spectrum density of ultra-wideband pulse signal modulation[D]. Shanghai: Fudan University, 2008)
- [7] 刘辉. 超宽带脉冲产生技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010. (Liu Hui. Research on impulse generation in UWB systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2010)
- [8] 王明. PIN 限幅器高功率微波重复脉冲效应机理研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2018. (Wang Ming. Research on the mechanism of repeated pulse effect of high power microwave with PIN limiter[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2018)
- [9] 王冬冬, 邓峰, 郑生全, 等. PIN 二极管限幅器的电磁脉冲损伤特性试验[J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(2): 65-69. (Wang Dongdong, Deng Feng, Zheng Shengquan, et al. Experimental investigation on the EMP damage characteristics of PIN diode limiters[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(2): 65-69)
- [10] 袁月乾, 陈自东, 马弘舸, 等. PIN 限幅器的高功率微波单脉冲效应研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 063003. (Yuan Yueqian, Chen Zidong, Ma Hongge, et al. High power microwave effect of PIN limiter induced by single pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 063003)
- [11] 陈自东, 秦风, 赵景涛, 等. 高功率微波作用下限幅器尖峰泄露特性[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 103014. (Chen Zidong, Qin Feng, Zhao Jingtao, et al. Spike leakage characteristic of limiter irradiated by high power microwave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 103014)
- [12] Park S, Lee C. An adaptive nulling scheme for approximated block diagonalization-based space shift keying in downlink multi-user massive MIMO systems[J]. *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 2018, 55(2): 22-28.
- [13] Ullah I, Munsif H, Razaq S, et al. Cylindrical phased array with adaptive nulling using eigen-correlation technique[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022, 32: e22969.
- [14] Liu Wenxiang, Lu Zukun, Wang Zhiying, et al. Sidelobes suppression for time domain anti-jamming of satellite navigation receivers[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14: 5609.
- [15] 张冲, 李锋, 税利, 等. 调零天线对 GNSS 接收机抗干扰能力影响研究[C]//第十届中国卫星导航年会论文集——S11 抗干扰与反欺骗技术. 2020: 22-27. (Zhang Chong, Li Feng, Shui Li, et al. Research on the effect of zeroing antenna on anti-jamming capability of GNSS receiver[C]//11th China Satellite Navigation Annual Conference. 2020: 22-27)
- [16] Cao Kejin, Luo Zhengwang, Ma Hengchao, et al. Phase analysis and error compensation of anti-jamming nulling algorithm for satellite navigation array antenna[J]. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 2020, 19(3): 249-255.
- [17] 李成城, 李鹏程. 卫星导航自适应调零天线抗干扰技术[J]. *电子信息对抗技术*, 2020, 35(6): 59-63. (Li Chengcheng, Li Pengcheng. Anti-jamming technology of adaptive nulling antenna of satellite navigation[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2020, 35(6): 59-63)
- [18] 李永龙, 袁雪林, 刘九龙, 等. 基于低轨卫星的分布式超宽带电磁脉冲对地面接收机干扰技术[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 033006. (Li Yonglong, Yuan Xuelin, Liu Jiulong, et al. Jamming technology of distributed ultra-wideband electromagnetic pulse to ground receivers based on low-orbit satellites[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 033006)