

文章编号: 1001-4322(2007)09-1580-05

L 波段微波脉冲对微型计算机的辐照效应实验^{*}

刘长军, 闫丽萍, 范如东, 罗 俊, 蒲天乐

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘 要: 在 L 波段使用 1.3 GHz 载波频率的微波脉冲辐照微型计算机主板, 通过改变脉冲宽度、重复频率和脉冲串长度等参数, 实验研究了微波脉冲辐照导致微型计算机失去响应的功率阈值的变化规律, 讨论了 L 波段微波脉冲辐射的积累效应。实验结果表明: 当微波脉冲宽度增加时, 微波功率阈值下降; 当微波脉冲重复频率升高时, 微波功率阈值呈下降趋势; 在固定重复频率的条件下, 微波脉冲数目的增加也会导致微波功率阈值的下降; 微波脉冲功率阈值始终小于连续波微波的功率阈值。当微波脉冲间隔时间较长或者脉冲宽度较宽时, 微波功率阈值由单个微波脉冲的参数确定, 与脉冲重复频率没有明显关系。利用假设的微波脉冲辐射积累效应, 可以定性解释和分析微波脉冲辐照微型计算机实验中功率阈值变化的趋势。

关键词: 微波脉冲; 微型计算机; 电磁兼容; 辐照效应; 功率阈值

中图分类号: O 441.4

文献标识码: A

现代社会中电磁环境日益复杂, 强电磁脉冲辐射频谱越来越宽, 并且干扰范围更为广泛。近年来, 国内外开展了电磁辐射影响电子设备或系统的研究^[1-5]。随着中央处理器(CPU)主频的提升和周边器件集成化程度的不断提高, 计算机产生的电磁辐射频率也随之升高。另一方面, 电磁辐射对微型计算机的干扰也日趋严重, 学者们进行了相关研究^[6-8]。相对于连续波, 脉冲电磁波的存在更为广泛, 而且可能存在积累效应^[9], 对电子设备造成的危害也就更多。

电磁辐射通常通过“前门”耦合进入计算机系统干扰计算机的正常工作。在前期研究的基础上^[6, 10], 本文以计算机主板作为微波辐照对象, 通过调节 L 波段微波脉冲调制波形的脉冲宽度、脉冲数目和重复频率等参数, 实验研究了微波脉冲辐射导致计算机“死机”的功率阈值。考察了微波脉冲辐射的积累效应, 初步探讨了微波脉冲辐照微型计算机出现积累效应的条件。

1 实验方法和实验设备

实验采用脉冲调制的微波对微型计算机主板进行辐照。实验系统如图 1 所示, Agilent E 8367C 微波矢量信号发生器可以产生多种调制的微波脉冲信号, 输出频率范围 0.2 Hz ~ 20 GHz; QF 3863 型宽带微波功率放大器频率范围 1 ~ 2 GHz, 最大输出功率 37 dBm, 功率增益 55 dB; 辐射天线采用宽带微带天线^[11], 使用 Agilent E 8362B 微波矢量网络分析仪测量宽带微带天线的回波损耗, 在 1.2 ~ 3.2 GHz 的频率范围内电压反射系数低于 -15 dB。该宽带微带天线在 L 波段具有良好的辐射性能, 可以实现微波脉冲对微型计算机主板的辐照。实验中接受微波脉冲辐照的微型计算机 CPU 为 Intel Celeron II 566 MHz, 南北桥为 Intel 810 芯片组, 内存为 SDRAM 32 MB, 运行 Windows 98 操作系统。

通过微波矢量信号发生器设定微波脉冲的载波频率、脉冲宽度和脉冲间隔时间等参数。在控制计算机上使用汇编语言编写程序, 可以直接控制信号源输出微波脉冲的时间长度, 实现对输出脉冲数目的调节。微波脉

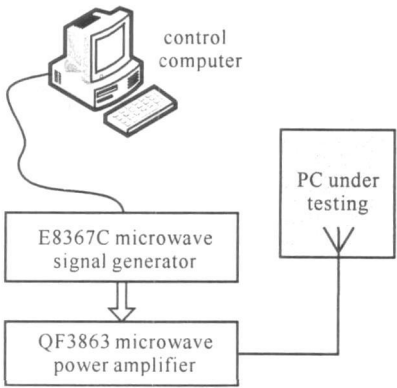


Fig. 1 Schematic of experimental system

图 1 实验系统框图

^{*} 收稿日期: 2007-02-28; 修订日期: 2007-07-24

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 刘长军(1973-), 男, 教授, 从事电磁场与微波技术研究; ciliu@scu.edu.cn

冲信号经过功率放大器后,由宽带天线辐照个人计算机的主板。天线置于被测计算机主板正上方 12 cm 处。实验和测量系统均使用 50 Ω 特征阻抗的同轴电缆连接。

使用 Agilent E 4408B 频谱分析仪测量信号源生成的微波脉冲,观测到周期信号的离散频谱:随着脉冲宽度变窄,离散频谱不断展宽;随着重复频率升高,相邻离散频点间隔不断减小。频域测量可以获得微波脉冲的基本参数,时域测量则可以获得更准确的脉冲波形。本文利用数字示波器获取微波脉冲的波形,频谱分析仪进行辅助测量。

2 实验结果

被测计算机正常启动,不运行其他程序,处于空闲状态。使用矢量信号发生器 E 8367C 在 L 波段产生扫频的连续波微波信号(脉冲宽度无穷大的微波脉冲),逐步增大信号的幅度,直到被测计算机出现“死机”现象,确定实验配置条件下微波辐照的敏感频率范围。本文选取 $f_0=1.3\text{ GHz}$ 为微波脉冲的载波频率。

2.1 微波脉冲的波形

使用 Tektronix DPO 7254 数字荧光示波器采集微波脉冲的时域波形。设定微波矢量信号发生器载波频率 $f=1.30\text{ GHz}$,脉冲宽度 $\tau=1\text{ }\mu\text{s}$,峰值功率为 0 dBm,测量微波脉冲信号前沿及中心 10 ns 范围的电压波形如图 2 所示。整个脉冲包括约 1 300 个载波信号的周期,波形近似为方波。由于阻抗匹配和示波器采样率的原因,示波器测量的信号电压低于 0 dBm 信号对应的电压。脉冲上升时间接近 50 ns (约 65 个载波信号周期,见图 2(a)),脉冲中心 10 ns 波形对应于 13 个载波周期,见图 2(b))。

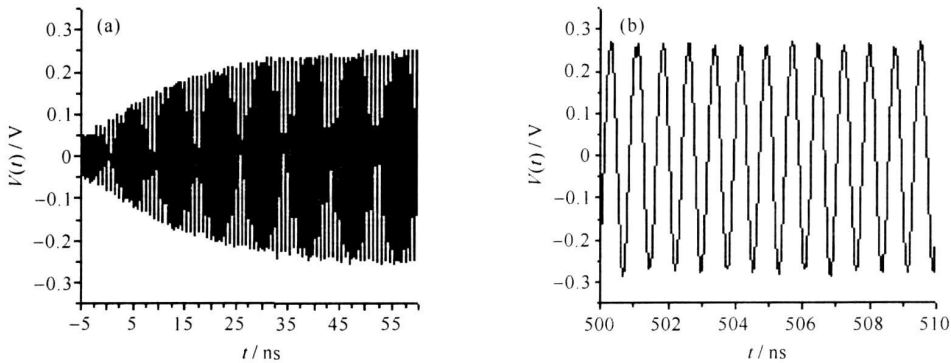


Fig . 2 Wavefor ms of microwave pulse

图 2 微波脉冲波形

当脉冲宽度 $\tau\geqslant 1\text{ }\mu\text{s}$ 时,脉冲波形更接近方波信号。如图 3(a)所示,脉冲宽度 $\tau=100\text{ }\mu\text{s}$ 的微波脉冲信号,脉冲的上升沿和下降沿更为陡峭。由于微波矢量信号发生器的限制,当脉冲宽度较窄时,脉冲幅度下降,波形发生变化。如果设定脉冲宽度 $\tau\leqslant 80\text{ ns}$,信号源输出脉冲波形失真严重而且幅度不稳定。设定脉冲宽度 $\tau=80\text{ ns}$,实际输出微波脉冲宽度只有 25 ns,如图 3(b)所示,脉冲幅度严重下降,出现明显拖尾。

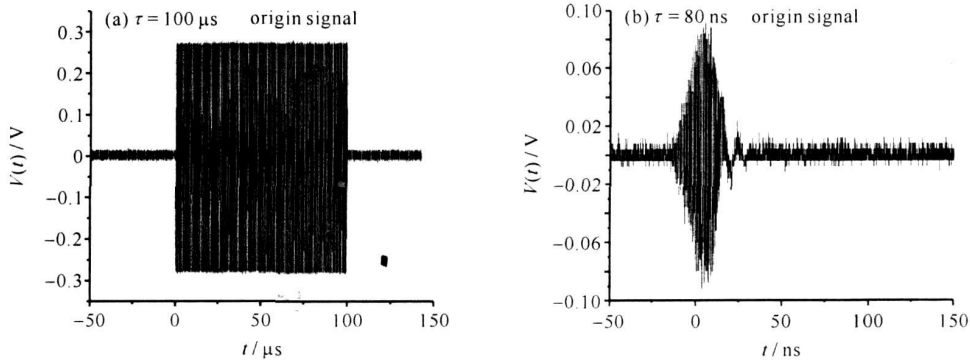


Fig . 3 Wavefor ms of microwave pulses with different pulse width

图 3 不同脉冲宽度的微波脉冲波形

图 4 给出了设定脉冲宽度 $\tau=100\text{ ns}$ 的放大前后微波脉冲波形图。输出脉冲近似为高斯脉冲,如图 4(a)所示,实际脉冲宽度为 60 ns 左右。实验使用的最小脉冲宽为 60 ns (信号源设定为 $\tau=100\text{ ns}$),波形近似为高

斯脉冲。微波脉冲经过功率放大器后,可以较好地保持原来的波形。经过放大后的脉冲宽度略有增加,略出现拖尾,见图 4(b)。

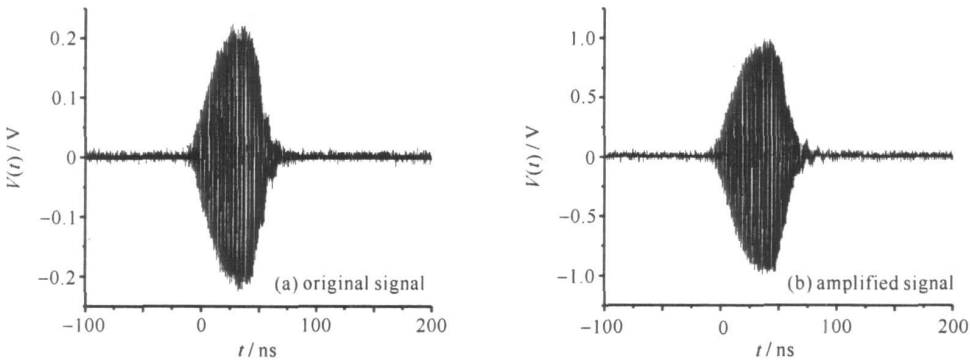


Fig. 4 Waveforms of original and amplified microwave pulses with pulse width of 100 ns

图 4 脉冲宽度 100 ns 的微波脉冲信号波形和放大后的信号波形

2.2 脉冲参数对微波辐照效应的影响

如果微波脉冲的周期为 T , 即两个相邻脉冲前沿的间隔为 T , 则定义微波脉冲的重复频率为

$$f_{\text{re}} = 1/T \tag{1}$$

控制输出微波脉冲宽度为 $60\text{ ns} \sim 10\text{ ms}$, 脉冲重复频率为 $0.1\text{ Hz} \sim 10\text{ kHz}$, 实验测量被辐射计算机“死机”时需要馈入天线的最小峰值功率, 得到如表 1 所示的微波脉冲功率阈值 P_{th} 。

表 1 脉冲宽度和重复频率对微波脉冲功率阈值的影响

Table 1 Microwave pulse power threshold with pulse width and repeat frequency

τ/t_s	P_{th}/dBm					
	10^{-1} Hz	10^0 Hz	10^1 Hz	10^2 Hz	10^3 Hz	10^4 Hz
0.06	36.3	36.2	36.2	35.1	35.0	34.6
1.0	32.9	32.5	31.3	30.5	30.4	30.1
10	31.7	31.7	30.7	30.5	30.1	30.0
10^2	30.9	30.7	30.5	30.3	29.9	29.8
10^3	30.6	30.5	30.2	29.9	29.8	29.8
$\geq 10^4$	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8

从表 1 的实验结果可以看出:随着微波脉冲宽度的增加或者重复频率的升高,微波脉冲功率阈值随之下降。当脉冲宽度大于 10 ms 时,重复频率对微波脉冲功率阈值没有显著影响。当微波脉冲重复频率较低时,比如在重复频率低于 1 Hz 的时候,重复频率对微波脉冲功率阈值没有显著的影响。

2.3 微波脉冲的积累效应

在实际的电磁环境中,电磁脉冲往往是有限数目的脉冲串,而不是一个无限延续的脉冲串。在 2.2 节中,实验考察了无限延续微波脉冲的辐照作用。如果在两种条件下微波脉冲功率阈值一致,但可能导致计算机“死机”需要的微波脉冲数目相差很多,通过 2.2 节的实验无法进行区分。为了进一步分析微波脉冲对计算机的辐照效应,需要考虑微波脉冲数目与微波功率阈值之间的关系。

如果要监视被测计算机“死机”的准确时间,测试电路和程序均很复杂,必须连通被测计算机和控制计算机,不易实现准确测量。当脉冲重复频率高时,难以确定多少个微波脉冲导致计算机“死机”。本文在固定微波脉冲数目的条件下,测量两种脉冲宽度微波脉冲的功率阈值。在控制计算机使用汇编语言编写程序,精确计算 CPU 指令的周期数,通过计算机接口触发微波矢量信号发生器的控制电路,实现对微波脉冲串时间长度的控制。当微波脉冲的重复频率固定时,实现了对脉冲个数的控制。

实验设定微波脉冲载波频率为 1.3 GHz , 脉冲重复频率为 10 kHz , 脉冲宽度分别为 1 和 10 ns 。控制微波脉冲个数 N 在 $1 \sim 64$ 之间,实验测量计算机“死机”的微波脉冲功率阈值如表 2 所示。当脉冲数目 N 较低时,需要进行多次实验才能确定每次一定导致计算机“死机”的微波功率阈值。

从表 2 中可以看出,微波脉冲辐射存在一定的积累效应,随着微波脉冲数目的增加,微波脉冲功率阈值趋于下降。当脉冲数目较高时,微波脉冲功率阈值受脉冲数目影响较小。当微波脉冲宽度较小时,微波脉冲功率

阈值对微波脉冲数目变化更为敏感。

3 实验结果分析

微波脉冲辐照导致计算机“死机”，在停止辐照后计算机可以重新启动并正常工作。因此，实验中的微波脉冲辐照没有造成硬件损伤，而是影响了计算机主板上的信号电平，使计算机失去响应。实验发现：随着单位时间内脉冲数目的增加，微波功率阈值呈现下降趋势；随着脉冲宽度的减小，微波功率阈值呈现上升趋势。当脉冲宽度较宽时，单个微波脉冲辐射就可以导致计算机“死机”，微波功率阈值几乎不受重复频率的影响。微波脉冲数目对微波功率阈值也有影响，在一定条件下随着脉冲数目增加导致微波功率阈值下降。

实验结果显示微波脉冲辐照具有一定的积累效应。我们据此推测有类似微波整流电路在微波辐照下将出现电荷积累，可以用图 5 所示的简化等效电路模型进行定性解释。微波脉冲辐射通过电磁耦合等效为信号源，器件 PN 结等效为二极管 D，输入阻抗和电容构成等效 RC 电路。当连续波微波辐射强度足够高时，RC 电路上直流电压超过电平阈值，影响逻辑门 T 和后续电路的工作，可能导致计算机失去响应。如果微波脉冲宽度足够宽，超过了 RC 时间常数，微波功率阈值主要将由单个脉冲的参数决定。如果脉冲间隔远大于 RC 时间常数，电荷无法积累，微波功率阈值依然主要由单个脉冲决定。只有当微波脉冲宽度较窄、脉冲间隔时间低于或者接近 RC 时间常数时，才有可能观测到微波辐照的积累效应。实际等效电路远比图 5 的模型复杂，而且微波脉冲辐照在计算机主板上可能存在多个作用点，所以上述讨论只是定性的分析。

在实验中，如果微波脉冲功率低于阈值，即使长时间辐射也不会导致计算机“死机”。因此，基本上排除用概率的理论来解释实验现象的可能性。在实验中确实观测到一定的偶然因素，尤其当脉冲数目较少或者重复频率较低的时候，微波脉冲功率阈值会有一些波动，但是不会影响实验结果的变化趋势。

4 结 论

实验研究 L 波段微波脉冲辐照微型计算机主板，得到以下结论：随着脉冲宽度的增加，微波功率阈值呈现下降趋势；随着重复频率的升高，微波功率阈值呈现下降趋势；脉冲微波的功率阈值总是高于微波连续波的功率阈值；在一定条件下，随着脉冲数目的增加，微波脉冲功率阈值呈现下降趋势。实验现象可以用微波脉冲辐照的积累效应进行定性的分析和解释。

由于受实验条件的限制，实验选取的微波脉冲参数不够全面。通过使用更先进的微波信号源，可以在大范围内精确控制微波脉冲参数，可望更准确地获得微波脉冲辐照效应的规律。此外，微波矢量信号源可以输出自定义波形的微波脉冲信号，既可以模拟自然界的雷电辐射，也可以用于模拟特殊微波脉冲源输出的辐射。微波矢量信号发生器在该领域具有广泛的用途。

参考文献：

[1] Backstrom M G, Lovstrand K G. Susceptibility of electronic systems to high power microwaves : summary of test experience [J]. *IEEE Trans on EMC*, 2004, **46**(3):396-403.

[2] Nitsch D, Camp M, Sabath F, et al. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats [J]. *IEEE Trans on EMC*, 2004, **46**(3): 380-388.

[3] 方进勇, 申菊爱, 杨志强, 等. 集成电路器件微波损伤效应实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **15**(6):591-594. (Fang J Y, Shen J A, Yang Z Q, et al. Experimental study on microwave vulnerability effect of integrated circuit. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **15** (6):591-594)

[4] 魏光辉, 陈亚洲, 孙永卫. 微波辐照对无线电引信的影响与作用机理[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(1):89-92. (Wei G H, Chen Y Z, Sun Y

表 2 不同脉冲宽度下微波脉冲功率阈值
随脉冲数目的变化关系

Fig.2 Microwave pulse power threshold dependent
on pulse number with width of 1 μs and 10 μs

N	P _{th} /dBm	
	1 μs	10 μs
1	37.1	32.6
2	35.9	32.3
4	34.9	32.1
8	33.9	31.7
16	32.8	31.3
32	31.9	30.9
64	31.2	30.7

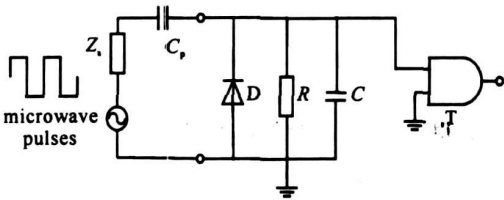


Fig.5 Greuit response model for microwave pulse radiation
图 5 初步的微波脉冲辐照响应电路模型

W · Effects and effecting mechanis m of microwave irradiation on the radio fuse · *High Power Laser and Particle Beams* , 2005, **17**(1):89-92)

[5] 刘长军,黄卡玛,胡仲霞,等·EMR 对混沌同保密通信系统干扰的初步研究[J]·强激光与粒子束, 2001, **13**(4):475-478.(Liu C J , Huang K M , Hu Z X , et al · Preli minary study on the interference of EMR to chaotic synchronous secure communication system · *High Power Laser and Particle Beams* , 2001, **13**(4):475-478)

[6] 刘长军,黄卡玛,闫丽萍,等·电磁辐射作用于计算机主板的模拟及效应评估[J]·强激光与粒子束, 2006, **18**(5):847-852.(Liu C J , Huang K M , Yan L P , et al · Si mulation and effects evaluation of electro magnetic radiation on computer motherboard · *High Power Laser and Particle Beams* , 2006, **18**(5):847-852)

[7] 蒲天乐,刘长军,闫丽萍,等·微型计算机微波辐照效应的实验研究[J]·强激光与粒子束, 2006, **18**(9):1549-1552.(Pu T L , Liu C J , Yan L P , et al · Experi mental study on microwave radiation effects on personal computer · *High Power Laser and Particle Beams* , 2006, **18**(9):1549-1552)

[8] 高成,周壁华,石立华,等·微型计算机在脉冲磁场作用下的效应试验[J]·强激光与粒子束, 2004, **16**(2):205-208.(Gao C , Zhou B H , Shi L H , et al · Effects of pulsed magnetic field on personal computers · *High Power Laser and Particle Beams* , 2004, **16**(2):205-208)

[9] 曹金坤,周东方,牛忠霞,等·重复频率高功率微波脉冲的大气击穿[J]·强激光与粒子束, 2006, **18**(1):115-118.(Cao J K , Zhou D F , Niu Z X , et al · Air breakdown by repetition high power microwave pulse · *High Power Laser and Particle Beams* , 2006, **18**(1):115-118)

[10] 刘长军,闫丽萍,黄卡玛·射频通信电路设计[M]·北京:科学出版社, 2005.(Liu C J , Yan L P , Huang K M · RF communication circuit design · Beijing : Science Press , 2005)

[11] 吕文俊,程崇虎,朱洪波·一种新型超宽带微带折线环天线的研究与设计[J]·通信学报, 2005, **26**(10):65-68.(L ü W J , Cheng C H , Zhu H B · Novel ultra wideband microstrip meandered loop antenna · *Journal on Communications* , 2005, **26**(10):65-68)

Radiation effects of microwave pulses in L band on personal computer

LIU Chang jun , YAN Li ping , FAN Ru dong , LUO Jun , PU Tian le
(School of Electronics and Information Engineering , Sichuan University , Chengdu 610064, China)

Abstract : The radiation effects of L band microwave pulses with a carrier frequency at 1.3 GHz on a personal computer motherboard are studied in this paper . Microwave pulse power thresholds are achieved in experi ments with different pulse parameters , such as pulse width , pulse repetition frequency and pulse number . Microwave radiation beyond power thresholds will lead to personal computer system crashes . Moreover , the cumulative effects of microwave pulse radiation are discussed briefly as well . The power thresholds decrease , when either the pulse width is longer , or the pulse repetition frequency is higher , or the pulse number at a fixed repetition frequency increases . The power thresholds of pulsed microwave are always less than that of continuous microwave . On the other hand , when either the interval between microwave pulses or the microwave pulse width is long , the power thresholds are determined only by characteristics of a single microwave pulse and are independent on the repetition frequency . The experiment phenomena can be analyzed and explained with the cumulative effects of microwave pulse radiation .

Key words : Microwave pulse ; Personal computer ; Electro magnetic compatibility ; Microwave radiation effect ; Power threshold