

文章编号: 1001-4322(2006)09-1549-04

微型计算机微波辐照效应的实验研究^{*}

蒲天乐, 刘长军, 闫丽萍, 范如东, 罗 俊

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘 要: 微波辐照频率为 1.2~2.0 GHz 时, 利用宽带天线对微型计算机主板进行微波辐照, 考察了微波辐照载波频率、调制方式和调制深度对微波辐照效应的影响, 得到了计算机分别处于满负荷工作、内存读写操作、磁盘读写操作和系统空闲 4 种工作状态下的微波辐照干扰功率阈值。实验结果表明: 微波辐照的载波频率为 1.47 GHz 时, 辐照干扰功率阈值最低, 为 32.7 dBm, 计算机最易被干扰; 瞬时功率是干扰微型计算机的关键参数, 调制方式、调制频率和深度对微波辐照干扰功率阈值影响不大; 处于高负荷工作状态的微型计算机更易于被微波辐射干扰; 计算机启动的干扰功率阈值为 32.0 dBm, 小于正常工作状态时的阈值。

关键词: 微波辐照; 电磁干扰; 功率阈值; 调制方式; 计算机

中图分类号: O441.1

文献标识码: A

伴随计算机技术的高速发展, 计算机应用已经深入到社会各个领域。对电子设备进行微波辐照产生的电磁干扰已越来越受到人们的重视, 特别是电磁脉冲对计算机系统、集成电路及无线电引信等的干扰, 国外已有相当深入的研究^[1-2], 国内也有相关的报道^[3-8]。计算机微波辐照是电磁波通过电磁耦合干扰 CPU 指令和数据电平, 影响计算机的正常工作, 干扰对象主要是 CPU 和内存, 耦合途径主要是各种数据线和 PCB 板。它可以使计算机产生误动作、功能失效或“死机”。本实验将微型计算机置于宽带天线辐射之下, 通过改变微波频率、调制方式和深度, 研究了微波辐照对微型计算机的干扰方式, 干扰功率阈值与载波频率、调制方式的关系, 考察了计算机处于各种工作状态下的干扰功率阈值。

1 实验方法和实验设备

实验采用微波连续波调制, 实验系统如图 1 所示, DF1631L 型低频信号源可以产生方波、脉冲、三角波和正弦波等信号, 频率范围为 0.2 Hz~2.0 MHz, 用作调制信号发生器; QF1481 型微波信号发生器接收外加信号调制, 输出载波频率范围是 0.1~2.1 GHz, 用于产生调制微波信号; QF3863 型微波放大器工作频率范围为 1.0~2.0 GHz, 最大输出功率为 37 dBm, 用于微波信号的功率放大; 辐射天线采用宽带微带天线^[9], 实现对微型计算机的微波辐照。

实验采用的微型计算机 CPU 为 Intel Celeron II 566MHz, 南北桥 Intel 810 芯片组, 内存 32 MB, 操作系统 Windows 98。天线置于主板上方 12 cm 处, 使用 Agilent E8362B 微波矢量网络分析仪测量天线的回波损耗, 结果如图 2 所示。当载波频率为 1.2~3.2 GHz 时, 反射系数低于 -15 dB, 满足实验测试条件。使用

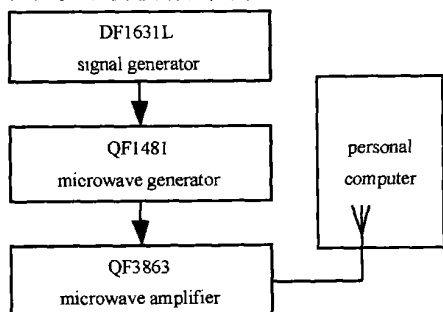


Fig. 1 Sketch map of experimental system

图 1 实验系统框图

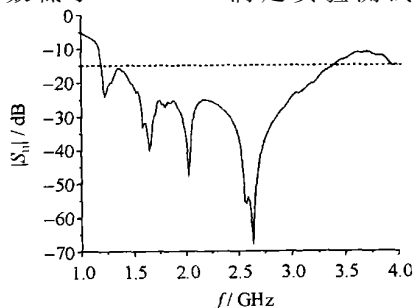


Fig. 2 Return-loss of broadband antenna

图 2 宽带天线的回波损耗

^{*} 收稿日期: 2006-04-25; 修订日期: 2006-08-08

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 国家自然科学基金资助课题 (60301004)

作者简介: 蒲天乐 (1982-), 男, 硕士研究生, 从事电磁兼容研究; putianle@163.com。

联系作者: 刘长军 (1973-), 男, 博士导师, 从事电磁场与微波技术研究; cjlju@scu.edu.cn。

Agilent E4408B 频谱分析仪测试微波信号源生成的调幅信号。载波频率 $f_0=1.47\text{ GHz}$, 调制频率为 10 kHz 时, 调制信号频谱如图 3 所示。二次谐波($\Delta f=\pm 20\text{ kHz}$)调制信号幅度低于 -35 dB , 因此微波信号源具有较好的线性特性。

标准调幅信号可表示为^[10]

$$S_{\text{am}}(t) = [A_c + m(t)]\cos\omega_c t \tag{1}$$

式中: A_c 为未调制载波的幅度; ω_c 为载波频率; $m(t)$ 为周期性调制信号。定义调制深度为 $m_d = |m(t)|_{\text{max}}/A_c$, 则标准调幅信号的瞬时最大值为

$$S_{\text{am}}(t)|_{\text{max}} = (1 + m_d) A_c \tag{2}$$

具体实验步骤:(1)以不同载波频率, 调制波形为脉冲和方波, 调制深度为 100% 的微波辐照个人计算机主板, 得到微波辐照效应最显著的频率;(2)用调制微波进行辐照, 调节调制深度、调制频率, 考察调制参数对微波辐照效应的影响, 并分析调制微波对计算机辐照效应的作用机理;(3)让计算机处于 CPU 满负荷、磁盘读写、内存读写和系统空闲 4 种工作状态, 用脉冲调制深度 100% 的微波进行辐照, 考察计算机工作状态对微波辐照效应的影响;(4)用调制微波信号辐照计算机, 得到计算机正常启动的最小干扰功率阈值。

2 实验结果

2.1 载波频率对微波辐照效应的影响

以调制深度 $m_d=100\%$ 、调制频率 100 Hz 、占空比 $1:7$ 的脉冲和占空比为 $1:1$ 的方波分别调制载波。为了检验输出微波辐照信号的参数, 使用 Agilent E4408B 测量微波放大器输出的载波信号的调制包络。如图 4 所示, 测量得到脉冲重复周期为 10.0 ms , 脉冲宽度为 1.23 ms , 调制频率准确但脉冲占空比有所下降。用调制微波辐照计算机主板, 测量计算机在空闲状态下“死机”的干扰功率阈值, 如表 1 所示, 其中干扰功率阈值及后文中的测量结果均为微波放大器的输出功率, 均是 5 次测量的平均值。由表 1 可见当载波频率为 1.47 GHz 时, 脉冲和方波调制的微波辐照的干扰阈值均最低, 计算机最容易受到干扰; 调制波形为方波还是脉冲, 对微波辐照的干扰功率阈值影响不大。表 1 中只列出了载波频率为 $1.4\sim 1.6\text{ GHz}$ 的情况, 当载波频率在 $1.25\sim 1.39\text{ GHz}$ 和 $1.6\sim 2.0\text{ GHz}$ 时, 计算机“死机”的微波辐照功率阈值均高于 37 dBm , 超出了 QF3863 微波放大器的 1 dB 压缩点功率。

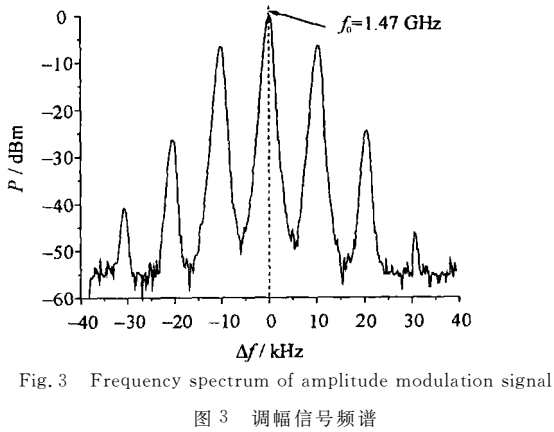


图 3 调幅信号频谱

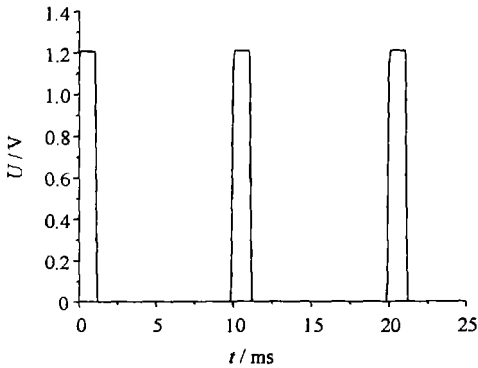


Fig. 4 Signal from microwave amplifier
图 4 实测微波放大器输出的调制信号

表 1 不同载波频率下功率阈值

Table 1 Power threshold under different carrier frequency

carrier frequency/GHz	power threshold/dBm		carrier frequency/GHz	power threshold/dBm	
	square wave	pulse		square wave	pulse
1.40	>37.0	36.8	1.50	36.8	>37.0
1.41	>37.0	>37.0	1.51	>37.0	>37.0
1.42	35.1	>37.0	1.52	>37.0	36.8
1.43	34.3	36.8	1.53	>37.0	35.1
1.44	35.1	35.1	1.54	36.8	35.1
1.45	35.1	35.1	1.55	>37.0	36.8
1.46	34.3	34.3	1.56	>37.0	>37.0
1.47	32.7	32.7	1.57	>37.0	36.8
1.48	33.1	33.1	1.58	>37.0	36.8
1.49	35.1	34.3	1.59	>37.0	>37.0

2.2 调制深度和调制频率对微波辐照效应的影响

以频率分别为 400 Hz 和 1 kHz 的正弦信号作为调制信号,微波载波频率为 1.47 GHz,以 10% 为间隔变化调制深度 m_d ,计算机处于空闲状态下“死机”的平均干扰功率阈值,如图 5 所示。可见,随着调制深度的增加,处于空闲状态的计算机“死机”的微波辐照平均干扰功率的阈值不断下降。

根据(2)式得到调制信号的最大瞬时功率 P_m 、平均功率 P_{av} 和调制深度 m_d 的关系为

$$P_m = P_{av} + 20\lg(1 + m_d)$$

(3)

式中: P_{av} 为使处于空闲状态计算机“死机”的平均微波辐照功率。由(3)式可知,如果保持最大瞬时功率 P_m 不变,平均功率 P_{av} 随着调制深度 m_d 的增加而下降。保持调制深度 $m_d=0$ 时的最大瞬时功率 $P_m=32.7$ dBm 不变,根据(3)式计算不同调制深度 m_d 对应的平均功率 P_{av} 的理论值,如图 5 中实线所示。由图 5 可见,实验测量值与理论值吻合较好,因此实验中不同平均功率 P_{av} 对应的最大瞬时功率是常数,即无论 m_d 为何值,实际的最大瞬时功率不变,从而证明了导致计算机“死机”的微波辐照干扰功率阈值取决于调制微波信号的最大瞬时功率;当调制正弦波信号的频率分别为 400 Hz 和 1 kHz 时,功率阈值基本重合,因此当调制频率较小时,其变化对微波辐照效应影响不大。

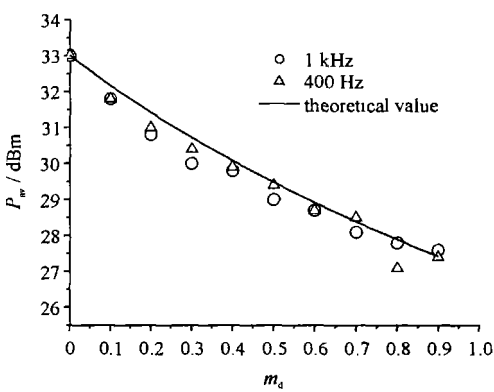


Fig. 5 Average power threshold of various modulation degree
图 5 不同调制深度的平均干扰功率阈值

2.3 计算机工作状态对微波辐照效应的影响

考察了计算机处于 4 种不同工作状态下的微波辐照效应。4 种工作状态为:CPU 满负荷工作(C)、磁盘读写(D)、内存读写(M)和计算机空闲(I),分别对应计算机的 4 种操作:运行计算圆周率的 Super PI 软件、执行 Windows 自带的磁盘整理工具、运行自行编写的内存读写程序 MemoryTest 和不运行任何程序。实验中的辐照信号参数为:载波频率 1 470 MHz,100% 调制深度,调制信号为占空比 1 : 7 的脉冲。调节调制频率,测量了计算机“死机”的干扰阈值,结果如表 2 所示。

表 2 不同工作状态干扰功率阈值
Table 2 Power threshold under different operating state

operating state	pulse repeat frequency/Hz	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
C	power threshold/dBm	34.5	34.6	34.7	34.7	34.8	34.8
D		35.2	35.2	35.2	35.2	35.0	35.1
M		34.4	34.3	34.5	34.4	34.3	34.6
I		36.2	36.2	36.1	36.0	36.0	35.8

由表 2 可以看出,计算机处于空闲状态最不容易被干扰,其次为磁盘读写,最容易被干扰的是处于内存读写的状态。这是由于进行内存读写时,CPU 同时也处于满负荷的工作状态。由此可见,计算机越处于高负荷的工作状态,越容易被干扰。另外,调制频率的变化几乎不影响干扰功率阈值。此外,在执行程序 Memory-Test 时,有内存读写错误的现象存在,但是几率不到 10%。因此,微波辐照影响的主要对象不是内存数据的读写操作,而是对 CPU 指令的干扰。

2.4 微波辐照干扰计算机启动

为了测量计算机正常启动的最小微波干扰功率阈值,用辐射天线辐照处于关闭状态的计算机,然后再开机,考察计算机能否通过自检启动。辐照信号参数为:载波频率 1.47 GHz,100% 调制深度,调制信号为占空比 1 : 7,重复频率 100 Hz 的脉冲。测量结果表明,启动计算机的最小功率微波辐照干扰功率阈值为 32.0 dBm,与表 1 和表 2 比较发现,此功率阈值小于正常工作状态下的功率阈值。由于微波辐照干扰了计算机硬件设备从断电到加电工作的转换过程,使计算机对硬件设备的识别和检查出错,导致无法正常启动。因此,计算机在启动过程中更易受到微波辐照干扰。

验结果显示:微波载波频率和微波辐照最大瞬时功率是影响计算机微波辐照效应的关键因素,而调制深度、调制频率和调制波形对此影响不大;计算机被干扰的微波辐照功率阈值和计算机的工作状态相关,计算机越处于高负荷的工作状态,微波辐照功率干扰阈值越低;干扰计算机正常启动的最小微波辐照功率阈值,比计算机正常工作时被干扰的微波辐照阈值低。

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 Electromagnetic Compatibility*, 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 Electromagnetic Compatibility*, 2004, **46**(3):380-388.
- [3] 刘长军, 黄卡玛, 胡仲霞, 等. EMR 对混沌同步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. Preliminary study on the interference of EMR to chaotic synchronous secure communication system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(4):475-478)
- [4] 黄卡玛, 熊国安, 黄建华, 等. HPM 作用下 27 系列 EPROM 存储器失效的实验研究[J]. *电波科学学报*, 1996, **11**(4):45-49. (Huang K M, Xiong G A, Huang J H, et al. The experimental study of the series of 27-EPROM memory failure under the radiation of high power microwave (HPM). *Chinese Journal of Radio Science*, 1996, **11**(4):45-49)
- [5] 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. Simulation and effect evaluation of electromagnetic radiation on computer motherboard. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5):847-852)
- [6] 高成, 周璧华, 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)
- [7] 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)
- [8] 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. (Wei G H, Chen Y Z, Sun Y W. Effects and effecting mechanism of microwave irradiation on the radio fuse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(1):89)
- [9] 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. (Lü W J, Cheng C H, Zhu H B. Novel ultra-wideband microstrip meandered-loop antenna. *Journal of China Institute of Communications*, 2005, **26**(10):65-68)
- [10] 杨万全, 熊淑华, 卫武迪, 等. 现代通信技术[M]. 成都:四川大学出版社, 2000:79-94. (Yang W Q, Xiong S H, Wei W D, et al. Modern communication technology. Chengdu: Sichuan University Press, 2000:79-94)

Experimental study on microwave radiation effects on personal computer

PU Tian-le, LIU Chang-jun, YAN Li-ping, FAN Ru-dong, LUO Jun

(School of Electronics and Information Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The microwave radiation effects on a personal computer are investigated experimentally in the frequency range from 1.2 to 2.0 GHz. The microwave power threshold for the computer to be crashed is studied under various microwave carrier frequencies, modulation types and modulation degrees. The microwave power thresholds are obtained under 4 computer operating states, the full CPU load, the disk operating, the memory reading and writing and the system idle. The microwave radiation effect on the computer during system booting is also studied. The experimental results show that when the microwave carrier frequency is 1.47 GHz, the computer is interfered most easily. At low modulation frequency, the instantaneous microwave power is the key effect factor of the microwave radiation on the personal computer motherboard, and the modulation type, modulation frequency and degree affect the microwave radiation little. The high-load operating computer is interfered more easily. The computer during self testing is easier to be crashed under microwave radiation.

Key words: Microwave radiation effect; Electromagnetic interference(EMI); Power threshold; Modulation type; Computer