

时钟电路的电磁波干扰

作者: Cypress 台湾区应用工程经理 Michael Hsieh

所有会产生电压频率信号的电子组件都是潜在的电磁波干扰-“Electro-Magnetic Interference; , EMI”-的来源, 这些电磁波信号将会影响如收音机、电视或行动电话等电子产品的正常运作。大多数系统中产生电磁波噪声的主要来源是系统时钟的产生与分配电路, 本文将探讨电磁波干扰产生的原因、怎么测量电磁波干扰与如何降低电磁波干扰带来的影响。

电磁波发生的原理以物理学来说明, 当带负电荷的电子在电场中移动时会产生电磁场, 因此只要有电路中有电流信号存在, 就会形成电磁波。不过电磁波为什么会影响电子设备呢? 为什么计算机的 CPU 运作频率会干扰收音机或无线电话呢? 以收音机为例, 通常无线电台的运作频率在 88Mhz ~ 108Mhz, 波段与波段之间必须 200KHz 的空隔以避免相互干扰, 收音机本身为了要清晰的接收远方电台的信号, 而装置了高增益的接收放大电路以拾取微弱的电波信号。

个人计算机中的 PCI 总线与芯片组之间, 通常使用 33.3MHz 的频率来做为同步时钟, 跟随着 33.3MHz 的基础频率, 同时也会发生一系列的谐波频率 (谐波的频率是以基础频率为倍数而发生), 例如第三次谐波的频率为 99.9MHz, 恰巧落在收音机的工作频段内, 若是个人计算机附近正好有收音机频率调谐到 99.9MHz, 就会受到个人计算机 EMI 的干扰而产生噪声。

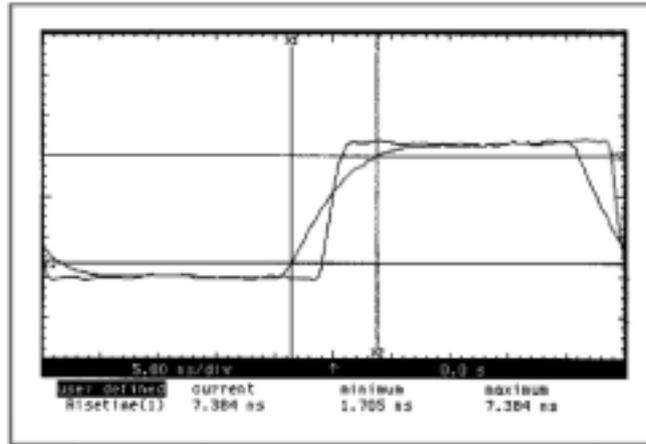
世界各国为了防止此类电子产品散发出来的电磁波干扰, 纷纷设立专责机构与制定条文来做为产品制造的规范, 像是美国的联邦通讯委员会 (Federal Communication Commission, FCC) 等, 目的都在限制电子产品的电磁波, 在特定距离所量测特定波段中的强度, 能保持在规定的信号强度标准以下。

电磁波的形成

在高速的数字电子产品中, 时钟产生器因长时间运作在固定的频率上, 使电磁波能量不断累积到极高的水平; 其余变动的、异步的信号则不会造成如同时钟电路这么高的电磁波干扰。因此时钟信号成为主要造成电磁波干扰的来源, 时钟会因其本身信号稳定震荡的特性, 或是信号终结不够妥善, 而会产生大量的 EMI, 这些电磁波能量将透过类似天线的结构对外散发出去。天线会以各种不同形式存在, 譬如印刷电路板上的线路、跳线、没有适当屏蔽的组件、连接器、缆线或是没有妥善接地的装置。

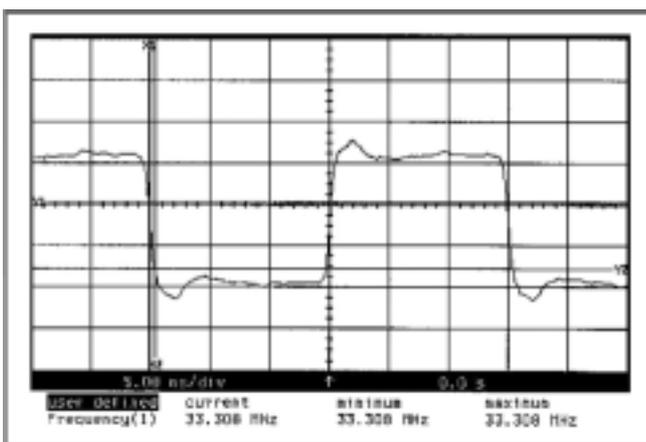
为了获得更快速的运算效能, 电子产品不断提高系统工作的时钟频率, 信号的变换速度也就随之提高。但信号波形的上升与下降速度加快, 将使电磁波辐射的能量大幅增加。图 1 显示两个具有相同频率、振幅、相位与工作周期的信号, 两者唯一的差别只在信号的转换率, 具有较快波形上升与下降速度的信号, 量测出来的电磁辐射能量将高于波形转换速度较慢者。

图 1. 不同信号转换率，对信号波形的影响

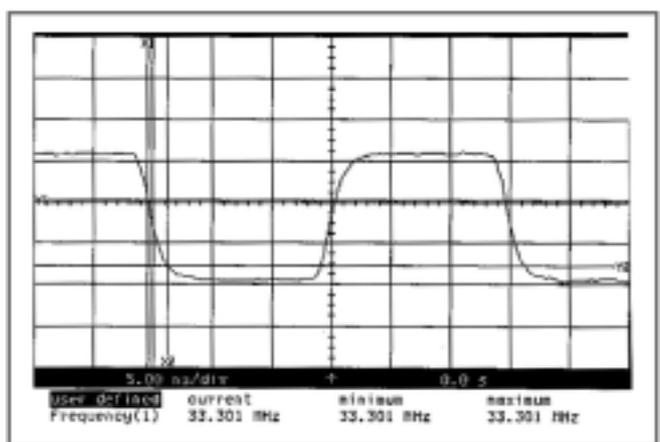


第二个会造成电磁波的因素，为电路中信号路径不正确的终结。若是终端的阻抗不匹配时，波形就会形成上缘凸起(Over-Shoot)或下缘陷落(Under-Shoot)的状况，使电磁波辐射的能量增强。视信号波形凸起或陷落程度的多寡，每个信号或节点可比正常的情况增加约 3 ~ 4 dB 的电磁波辐射，若同时有数十个信号或节点发生信号凸起的情形，想要通过 FCC 的测试根本是不可能的事情。图 2-(a)显示不正确的信号终结所造成的凸起与陷落；图 2-(b)右为正确的信号终结状态，有着较左图为低的 EMI。

图 2. 信号终结状态示意



(a) 不正确的视讯终结



(b) 正确的视讯终结

如何量测电磁波

通常要测量 EMI 的方式，是将受测的产品放置在一个受控制的环境之中，例如无电磁波回声室或开放空间测试场所 (Open Area Test Site, OATS)，测量由产品中辐射出来的电磁波强度，与 FCC 等单位所规定的限制值相比较。在 1975 年时，FCC 规定所有在产品功能上并非有意发出电磁波的设备，所辐射的电磁波强度，在特定的距离与频率测量时，不得超过 FCC 所规定的最大能量。

FCC 主要对辐射强度分成两大种类的标准，Class A 与 Class B。Class A 标准适用的产品类型「数字设备标示为商业、工业或办公场合用途，并不得在公众场所与家庭内所使用」，Class B 标准的适用产品则为「数字产品标示为家庭使用，但也可以适用于其它场合」。Class B 标准较 Class A 严格许多；表 1 显示 FCC Class A 与 Class B 的规格标准。

表 1. FCC 的 Class "A" 与 Class "B" 规格

Frequency (MHz)	Class "A" (10 meters)		Class "B" (3 meters)	
	$\mu\text{V}/\text{m}$	$\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$	$\mu\text{V}/\text{m}$	$\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$
30 - 88	90	39	100	40
88 - 216	150	43.5	150	43.5
216 - 960	210	46.5	200	46
> 960	300	49.5	500	54

当测试实验室完成受测产品的测量后，报告中的图表可显示出频率范围由 30MHz 到 1000MHz 的辐射能量强度，若是辐射能量强度的极大值低于上表中 FCC 对每个频段辐射强度的规范，则此产频就符合 FCC 的标准；但若是某个频率中的极大值超过 FCC 的标准，产品就必须进行修改或重新设计以降低电磁波辐射的强度。

减少电磁波辐射

有几种方法可以降低数字产品电磁波辐射的问题，工程师可以选择为产品加上屏蔽的处理、对信号加上滤波器或是减低散发电磁波组件的功率。第一种加上屏蔽的方式，并非对电路上，而是一种在机械结构上的解决方案，利用金属材质的封装，将 EMI 封闭在产品内部，不致泄漏出来。这种手法在过去经常被采用来对抗 EMI，但通常会大幅增加产品制造成本，并且若是问题发生在产品即将上市的时期，也将无法及时修改机壳的设计以符合 EMI 测试标准。

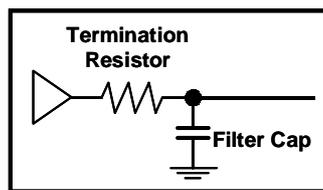
其它如滤波器与降低组件功率的手段，则是试图找出散发电磁波的源头，将其隔离出来。利用无电磁波回声室之类的测试场所，测量出超过辐射强度规定的特定电波频率，锁定这个频率或其谐波频率，即可判别出是那一时钟电路造成的电磁波辐射。在罪魁祸首确定之后，首先必须确保所有的信号线都有妥善的终结，其次分析该条时钟信号是否有波形凸起或陷落的现象，并适当的调整终端电阻的阻抗，使波形尽量保持平缓。

若仍旧无法降低 EMI 水平，则再检查该时钟信号的波形转换速度，尽量选用较低转换速度的组件。许多时钟缓冲器同时具备了高、低两种转换速度的型号可供选择，这两种形式缓冲器的脚位大多相同，可以轻易的互换；或是具备可程序化的波形变化斜率，使工程师可依系统需求自行

设定波形转换速度。在系统可以接受的状态下，采用较低的转换速度将可减少电磁波的辐射，此法也不会对产品的生产成本造成太大的影响。

若无法以低转换速度组件替换时，滤波是最常用来降低信号波形的边缘速度的方法，也就是在信号路径中加上 5 到 15pF 的电容器，用以平缓信号的边缘速度。通常工程师会在电路的设计中，靠近信号源头的位置，预留这些电容器的装设位置，直到发生 EMI 问题时，再将电容器装置上去。若时钟电路采用串接式的终端电阻，滤波电容器装置在电阻的两侧皆可，但为了获得最佳的信号终结与保持信号的完整性，则滤波电容建议装置在终端电阻之后靠信号来源的这一侧，如图 4 所示。

图 4. 滤波电容器的安装示意



虽然加上滤波电容可以有效的降低 EMI，但这方法也有其缺点存在：它降低了信号的完整性，将原本轮廓鲜明、波缘转折明确的高速时钟信号，转变为波缘平滑的信号，使组件不易准确的锁定信号时序；并且在每个时钟信号的分布都需加上滤波电容器，也会提高产品制造成本。

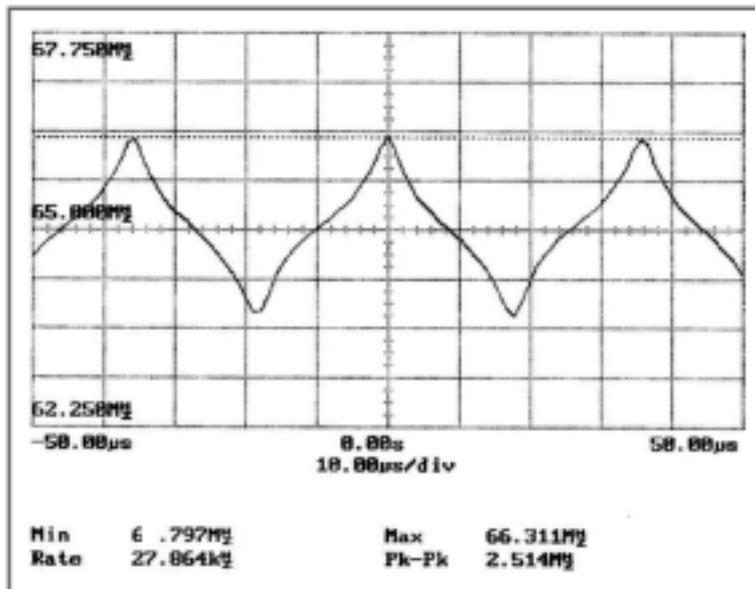
时钟频率展频

另一种降低电磁波辐射的方法为时钟调变。时钟调变又称做展频(Spread Spectrum)，最早于 1995 年时开始使用于计算机系统中，而现在几乎所有的个人计算机都设计有时钟展频的功能，用以降低 EMI 的发生，时钟展频可称的上是目前最能经济有效降低 EMI 的解决方案。

展频的工作原理，是将原本固定不变的时钟频率，以一定的周期，规律且小幅度的调变时钟频率，使系统产生的电磁波辐射能量，平均散布于一段频率范围内，不至于将能量集中在原始的时钟频率中，而超过了法规的标准。而且以原始时钟频率百分之零点五到百分之五的范围内，小幅调整运作频率，对于使用者而言，几乎无法察觉出展频前后有什么不同之处，若以原始时钟频率为中心进行展频，系统平均的运作效能完全不会受到展频的影响。

时钟展频降低 EMI 的程度，受到调变方式、频率变动比率与调变速率这三个参数所影响。展频的调变方式可以有多种选择，像是线性调变、正弦波调变与 LexmarkTM 曲线调变等，目前证实最能有效降低 EMI 的调变方式，就属 LexmarkTM 曲线调变了，如下图 5 所示。

图 5. Lexmark™ 曲线调变之波形



由图 5 的范例所示，原始频率为 65MHz，展频调变后输出频率分布范围从最低的 63.797MHz 到最高的 66.311MHz，这个例子因基础频率上下展频的比例相等，又称做「中央展频」。请注意 Lexmark™ 展频方式，在基础频率附近时，频率的变动较缓和；而在接近最高与最低频率时，频率的变动较剧烈。

展频的频宽可用时钟的最高频率减去最低频率而得，

$$BW = F_{MAX} - F_{MIN}$$

而一般会以展频频宽除以原始频率来表示时钟展频的程度，

$$BW\% = (BW / F_{REF}) * 100\%$$

以前例而言，

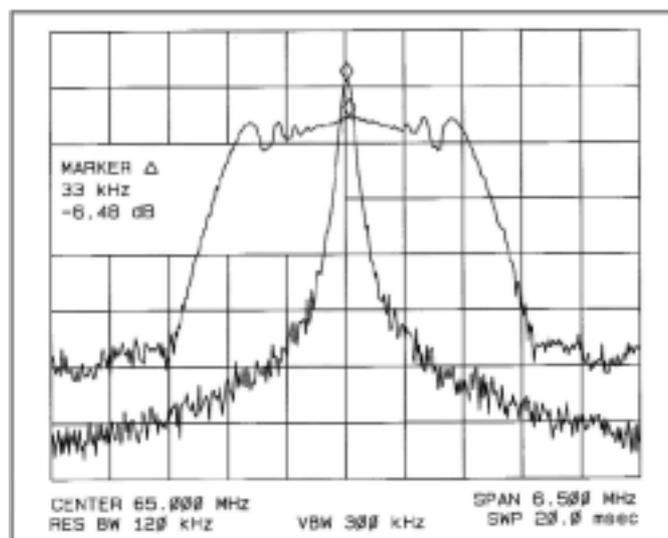
$$BW = 66.311MHz - 63.797MHz = 2.514MHz$$

$$BW\% = (2.514MHz / 65MHz) * 100\% = 3.87\%$$

这个 65MHz 的时钟在展频前后 EMI 的变化，可以使用频谱显示器观察出来，图 6 中未经展

频的时钟在 65MHz 的附近展现出极窄的频率范围，也较邻近频率带有极高的能量峰值；相较之下，经过展频后的时钟，虽然中央频率仍旧是 65MHz，但频率范围较宽，连带使能量平均分布在整个展频频宽当中，使电磁波辐射的强度在 65MHz 峰值处降低了 6.48dB。

图 6. 原始频率为 65 MHz 之下，展频前后的 EMI 变化



最后一个影响 EMI 降低值为展频的调变速率，这个速率是指展频方式重复的频率速度，在图 5 的 LexmarkTM 曲线范例中，调变速率为 27.86KHz。一般调变的速度介于 20KHz 到 200KHz 之间，若是调变速度低于 20KHz，有可能在系统中产生人耳可以听到的脉冲杂音；若调变速度高于 200KHz，时钟下游串接的 PLL 回路即可能因为组件频宽不足，无法锁定时钟频率而使系统失效。

展频系统中其余组件的时钟跟随

时钟展频能够很容易的整合至系统的时钟电路设计中，并有效降低系统电磁波峰值的产生。但在另一方面，若电路中的展频时钟电路之后，设计了其它的锁相回路，并利用展频的时钟来做为这些锁相回路的信号来源，在设计上就必须特别注意了。因为展频对系统的时钟进行不断的调变，下游的锁相回路组件必须能够快速反应追随这些频率变动，此时若是锁相回路的频宽不足，就容易产生时钟追踪的歪斜「Skew」，造成系统时钟抖动的增加。工程师们必须确定电路中所有的锁相回路组件都能够正确的追踪展频时钟频率的变动，若这些串接的锁相回路做为时钟电路缓冲器「clock buffer」中的组成部分，可以采用像是 Spread AwareTM这一类专为展频电路所设计并测试合格的时钟组件。

结语

目前的时钟电路运作频率极高，容易产生我们所不欲见的电磁波噪声，当电磁波的强度超过一定的程度时，这些恼人的电磁波将产生不可预期的影响，因此不可不注意预防。市面上已有许多以机械结构或是改变电路布局方式的电磁波干扰防治解决方案，但是这些解决方案都耗时费事并且所费不赀，若能在电路设计上的小细节多加留意，就可以有效的预防电磁波噪声的产生。

时钟信号若是没有妥善的被终结，或是时钟组件具有快速的瞬时特性，都会产生大量的电磁波噪声。若要控制电磁波噪声的产生，必须考虑下列几项原则：

- 妥善的终结所有的时钟信号
- 尽量采用波缘上升速度较低的时钟缓冲组件
- 在信号线路中采用滤波电容器
- 在高速的电路中采用展频时钟组件

只要在电路设计上遵守这些简单的规则，就可以以最低的成本，有效的控制电磁波噪声的产生，提高产品的竞争力。

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训推荐课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/tuijian/>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

手机天线设计培训视频课程

该套课程全面讲授了当前手机天线相关设计技术,内容涵盖了早期的外置螺旋手机天线设计,最常用的几种手机内置天线类型——如 monopole 天线、PIFA 天线、Loop 天线和 FICA 天线的设计,以及当前高端智能手机中较常用的金属边框和全金属外壳手机天线的设计;通过该套课程的学习,可以帮助您快速、全面、系统地学习、了解和掌握各种类型的手机天线设计,以及天线及其匹配电路的设计和调试...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/133.html>



WiFi 和蓝牙天线设计培训课程

该套课程是李明洋老师应邀给惠普 (HP)公司工程师讲授的 3 天员工内训课程录像,课程内容是李明洋老师十多年工作经验积累和总结,主要讲解了 WiFi 天线设计、HFSS 天线设计软件的使用,匹配电路设计调试、矢量网络分析仪的使用操作、WiFi 射频电路和 PCB Layout 知识,以及 EMC 问题的分析解决思路等内容。对于正在从事射频设计和天线设计领域工作的您,绝对值得拥有和学习!...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/134.html>



CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>