

# 基于近场辐射的非接触式数字信号测试方法

谢楷<sup>1</sup>, 王鹰<sup>2</sup>, 李小平<sup>1</sup>, 刘彦明<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

**摘要:**为解决自动测试系统的探针寿命及测试可靠性问题,提出一种针对数字电路的非接触式测试方法。利用平板天线及电荷放大器对节点近场辐射进行探测,通过边沿判别的方法恢复原始数字信号。讨论了天线模型、节点间串扰、判决门限选取等问题。给出了硬件实现方案,通过实验验证了该方法的有效性并测试其性能。

**关键词:**自动测试;非接触;近场辐射;数字信号

**中图分类号:** TM 930.12

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.11

## Non-contact digital signal testing method based on near-field radiation

XIE Kai<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, LI Xiao-ping<sup>1</sup>, LIU Yan-ming<sup>1</sup>

(1. School of Electronical & Mechanical Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. Equipment Inst. of the Second Artillery, Beijing 100085, China)

**Abstract:** A non-contact testing method for digital circuit is provided to extend probe's lifetime and increase reliability in automatic testing system (ATS). The near field radiation of circuit nodes is detected via a flat antenna and a charge amplifier, and the original digital signal is reconstructed by the edge-discriminate method. This paper focuses on the issue of antenna's model, crosstalk between nodes and thresholds selection, and the hardware implementation is also proposed. The validity and performance of the method are verified.

**Keywords:** automatic testing; non-contact; near field radiation; digital signal

## 0 引言

目前,电路板自动测试领域的信号获取方法主要有夹具、针床和程控飞针等,测试点信号的获取都是通过探针与电路板的接触获得的。即使采用金、铱等贵金属镀层,长期使用所带来的磨损仍然会导致针尖锐化和弹簧疲劳,从而引起接触不良,或接触电阻的变化,导致测量失败。在程控飞针式测试系统中,探针需要高速移动和多点探测,探针的寿命更短。探针的寿命约为数百万次,而目前较为先进的飞针测试机的测量速度可达每秒 50 次以上,因此探针属于耗材,其工作寿命只有数十小时。

此外,测试点表面的氧化层、防护漆等会造成测试可靠性下降;而各种柔软、轻薄的新材料、元件正逐渐变得更加普及,它们容易在测试过程中因机械力损伤或扭曲变形。

自 20 世纪 90 年代初,国外学者就提出了一些非接触式测试的方法,以解决探针寿命与测试可靠性问题。早期的研究主要包括利用电子束或等离子流构建电气通路<sup>[1-3]</sup>的方法;2005 年,有学者提出将被测节点信号经过调制后发射,接收后再进行解调恢复原始信号<sup>[4-6]</sup>的方法;近年来研究热点主要集中在构建系统内部及片上无线通信网络<sup>[7-10]</sup>进行非接触自动测试。其中,利用电子束构建电气通道<sup>[1]</sup>的方法需要严格的真空

环境;用等离子流建立信号通道<sup>[2-3]</sup>需要借助激光器和其他复杂的设备。这两种方法成本都非常昂贵,只能小范围应用在实验室、半导体器件测试等高端领域。文献[4-10]中各种利用无线数据传输的非接触测试方法共同特点是需要对被测节点的信号进行 3 GHz~24 GHz 的高频调制,这要求被测电路经过特殊设计后才可能进行非接触测试。

上述各种方法的共同本质是跨越空气(或真空)介质建立非接触的信息通道。而电路工作时所发出的电磁辐射带有节点的信息,且辐射本身就能跨越空气介质形成信息通道。其中,数字信号节点在上升沿、下降沿时刻的电磁辐射最强烈。本文基于该原理,提出一种利用平板天线获取数字信号节点近场辐射,从中提取上升沿、下降沿时刻信息,进而恢复原始数字信号波形的办法。该方法具有无需昂贵的设备、易于硬件实现、无需对被测电路进行特殊设计、与传统通用自动测试系统兼容等特点,可用于通用数字电路测试领域。

## 1 节点近场辐射探测

### 1.1 天线结构及等效模型

采用平板天线结构在测试点上方对其近场辐射进行探测,如图 1 所示。其中,平板天线的耦合板尺寸与测试点大小相同,与测试点之间构成耦合电容,形成信息通道。

收稿日期:2009-12-02; 修回日期:2010-06-28。

基金项目:部委基金(9140A17030606DZ01)资助课题

作者简介:谢楷(1983-),男,博士研究生,主要研究方向为智能信息处理、自动测试。E-mail:KaiXie@mail.xidian.edu.cn

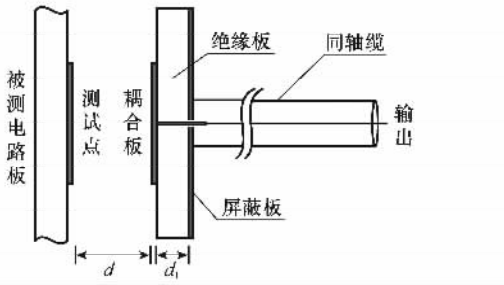


图 1 探测天线结构

假设测试点面积为  $s$ ,与耦合板之间的距离为  $d$ ,介质为空气(介电系数为  $\epsilon_0$ );绝缘层厚度  $d_1$ ,其相对介电系数为  $\epsilon_r$ ,同轴缆分布电容为  $C_s$ ,则探测天线的电路模型可等效为 2 个电容,如图 2 所示。其中耦合电容  $C_1$  容量为

$$C_1 = s\epsilon_0/d \quad (1)$$

分布电容  $C_0$  容量为

$$C_0 = C_2 + C_s = \epsilon_0\epsilon_r s/d_1 + C_s \quad (2)$$

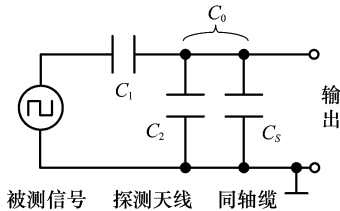


图 2 探测天线的等效电路模型

### 1.2 测试点间串扰

采用多天线对多个节点同时进行测试时,节点间因交叉耦合会带来串扰。如图 3 所示。信号通道  $S_{12}$ 、 $S_{32}$  是节点 1、3 对节点 2 的串扰路径。

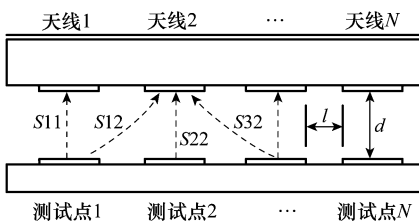


图 3 节点间交叉串扰

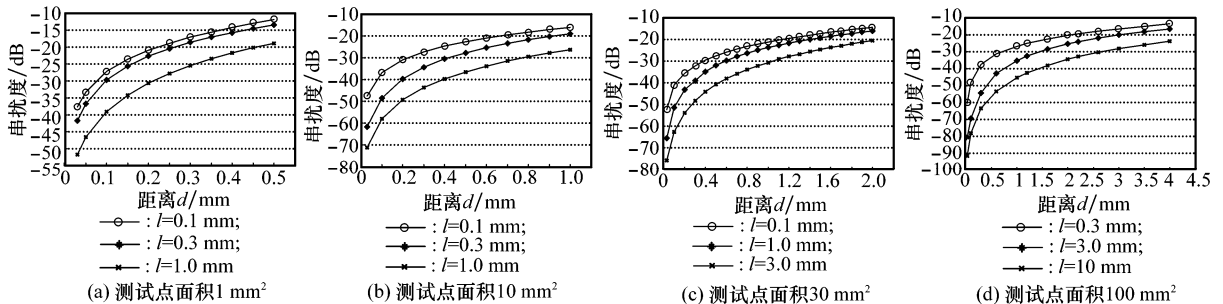


图 5 串扰度仿真结果

一般认为当串扰度小于  $-20$  dB 时,对后续判别及波形恢复电路影响较小,通过对数值仿真结果的回归分析,得出

假设天线  $i$  与测试点  $j$  之间的电容量为  $C_{ij}$ ,天线  $i$  自身的对地分布电容为  $C_i$ ,当天线所连接的放大器具有低输入阻抗时,则分布电容  $C_i$  的影响可以忽略。

假设测试点  $i$  电压变化量为  $\Delta U_i$ ,则测试点  $i$  向天线  $i$  所耦合的电荷量为

$$Q_i = \Delta U_i C_{ii} \quad (3)$$

除测试点  $i$  之外的其他测试点向天线  $i$  所耦合的串扰电荷量为

$$q_i = \sum_{i \neq j} \Delta U_j C_{ij} \quad (4)$$

假设各节点的电压变化量相同,则串扰度为

$$\phi_i = \frac{q_i}{Q_i} = \frac{\sum_{i \neq j} C_{ij}}{C_{ii}} \quad (5)$$

考虑到串扰主要能量来自于相邻节点间,式(5)可简化为

$$\phi_i = \frac{C_{i(i-1)} + C_{i(i+1)}}{C_{ii}} \quad (6)$$

式中, $C_{ii}$  近似于平行板电容器,而  $C_{i(i-1)}$  与  $C_{i(i+1)}$  由于边界效应的影响,计算相对困难。利用 Ansoft-Maxwell 电磁仿真软件对被测节点及相邻节点进行建模,如图 4 所示。对节点 2B 施加激励电压,电荷将耦合至相邻 5 个节点。考虑到节点 1A、1C 是低阻源、天线 2A、2B、2C 连接有低阻抗放大器,都按接地考虑,通过仿真节点 2A 向天线 1B、3B 耦合的电荷量得出  $C_{21}$  与  $C_{23}$  的值,仿真节点 2A 向天线 2B 耦合的电荷得出  $C_{22}$  的值,再根据式(6)计算串扰度。

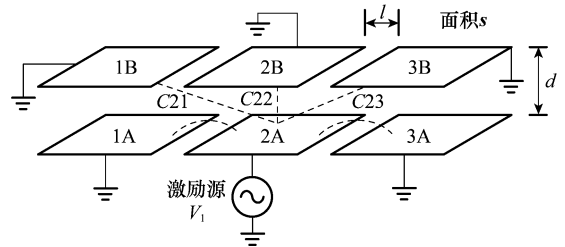


图 4 串扰度仿真模型示意图

在不同测试点面积  $s$ 、天线与测试点距离  $d$ 、缝隙间距  $l$  的条件下,对串扰度进行数值计算,结果如图 5 所示。

满足串扰度小于  $-20$  dB 的经验公式

$$l > 3d - 0.6\sqrt{s} + 0.2 \quad (7)$$

式中,  $s$  是测试点面积;  $d$  是测试点与天线间距;  $l$  是测试点间缝隙最小距离。当测试点及天线非矩形时(如圆形), 因缝隙平均距离大于其最小间距, 式(7)也适用。

## 2 数字节点信号恢复

数字信号的电磁辐射发射主要集中在信号上升沿与下降沿时刻。探测及信号恢复的总体方案如图 6 所示, 将天线获取的辐射信号放大后, 判别其上升沿与下降沿时刻, 再通过 RS 触发器恢复出原始信号。

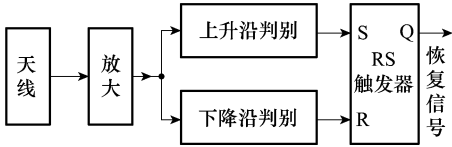


图 6 非接触数字信号恢复方案

### 2.1 信号放大电路设计

当同轴电缆较长时, 图 2 天线等效电路模型中, 分布电容  $C_0$  将远大于耦合电容  $C_1$ 。为避免分布电容引起衰减, 采用具有接近零输入阻抗的电荷放大器作为前级放大电路, 如图 7 所示。分布电容  $C_0$  两端无压差, 对信号无衰减。

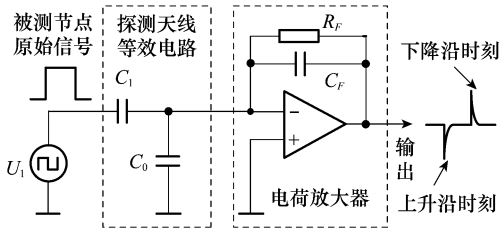


图 7 放大电路

假设被测数字信号  $U_1$  为方波, 高电平幅度为  $U_H$ , 低电平幅度为 0, 天线等效耦合电容量为  $C_1$ , 电荷放大器反馈电容  $C_F$ , 反馈电阻  $R_F$ , 忽略运放非理想特性, 从被测信号的上升沿时刻开始, 经过时间  $t$ , 有

$$U_{O1} = -U_H \frac{C_1}{C_F} e^{-\frac{t}{R_F C_F}} \quad (8a)$$

从被测信号的下降沿时刻开始, 经过时间  $t$ , 有

$$U_{O2} = U_H \frac{C_1}{C_F} e^{-\frac{t}{R_F C_F}} \quad (8b)$$

式(8)说明在上升沿及下降沿得到了不同符号的脉冲信号, 脉冲峰值出现在  $t=0$  时刻, 通过判决脉冲符号, 可获得原始信号边沿出现的时间信息, 从而恢复信号。通过改变  $C_F$  可以调整系统增益。

### 2.2 信号判决与恢复

假设节点  $i$  与其相邻节点间的串扰度为  $\phi_i$ , 则由串扰引起的干扰电压的最大值发生在所有相邻节点信号同时正(负)跳变的时刻, 其中相邻节点同时正跳变叠加所产生的干扰电压  $U_{N1}$  为

$$U_{N1} = \phi_i U_{O1} \Big|_{t=0} \quad (9a)$$

相邻节点同时负跳变叠加所产生的干扰电压  $U_{N2}$  为

$$U_{N2} = \phi_i U_{O2} \Big|_{t=0} \quad (9b)$$

考虑在干扰电压峰值与信号峰值之间保留最大的噪声容限, 原始信号上升沿时刻的判决门限电平取

$$U_{th1} = \frac{U_{N1} + U_{O1} \Big|_{t=0}}{2} = -\frac{(1 + \phi_i) C_1}{2 C_F} U_H \quad (10a)$$

同理, 原始信号下降沿时刻的判决门限电平取

$$U_{th2} = \frac{U_{N2} + U_{O2} \Big|_{t=0}}{2} = \frac{(1 + \phi_i) C_1}{2 C_F} U_H \quad (10b)$$

该组判决门限保证不会因串扰导致误码, 同时留有最大的噪声容限。

判决及信号恢复的硬件实现如图 8 所示。根据式(10)的门限, 利用比较器判决上升沿以及下降沿, 获得与原始信号上升沿/下降沿同时刻的脉冲信号, 再经过 RS 触发器恢复原始信号。

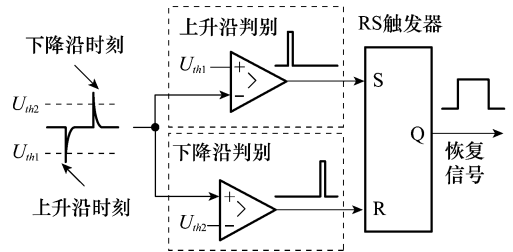


图 8 判别及恢复电路

## 3 实验与测试

选择了一块数字信号处理板作为测试对象, 其电平为 5V CMOS 逻辑, 测试点及天线面积均为  $2 \text{ mm}^2$ , 之间距离  $d=0.5 \text{ mm}$ , 介质为空气, 测试点附近无其他测试点, 即串扰度为 0。

根据式(1), 耦合电容  $C_1$  约为  $0.035 \text{ pF}$ , 理论上反馈电容  $C_F$  取相同数量级可以得到与原始信号幅度同等数量级的输出信号, 但实际中  $1 \text{ pF}$  以下电容难于生产, 测试中取  $1 \text{ pF}$  极限值。为消除分布电容带来的影响, 对于反馈电容  $C_F$  的焊盘及连接线采取如图 9 所示的保护环接地方法, 将跨接在运放输出端及反向输入端之间的分布电容转化为两个对地电容。其中反向输入端对地无压差, 对地分布电容无影响; 运放输出端具有低阻抗, 对地电容影响也很小。

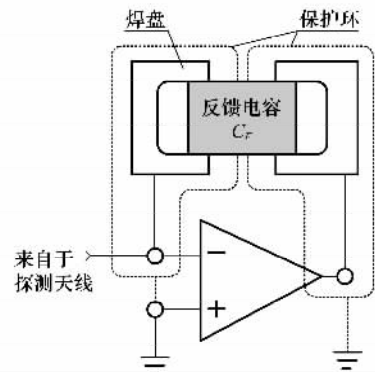


图 9 利用保护环消除分布电容

电荷放大器反馈电阻  $R_f = 20 \text{ k}\Omega$ ; 运放单位增益带宽  $BW = 1.6 \text{ GHz}$ ; 压摆率  $SR = 700 \text{ V}/\mu\text{s}$ ; 判决比较器选用 LM319, 具有  $50 \text{ ns}$  的响应速度。根据式(7), 电荷放大器输出峰值幅度  $175 \text{ mV}$ , 又根据式(9), 在串扰为 0 时, 判决门限电平为电荷放大器输出峰值的一半, 取  $\pm 87.5 \text{ mV}$ 。

图 10 是波形恢复过程中若干关键波形, 电荷放大器及判决、恢复逻辑正确, 得出了与被测节点波形一致的输出。其中电荷放大器输出电压峰值  $220 \text{ mV}$ , 比理论计算值  $175 \text{ mV}$  大, 原因是为防止测试时探头碰触测试点, 探头表面覆盖有阻焊层, 其介电系数比空气大, 导致  $C_1$  比理论计算值大, 相应地, 实际的判决门限也调整为  $\pm 110 \text{ mV}$ 。

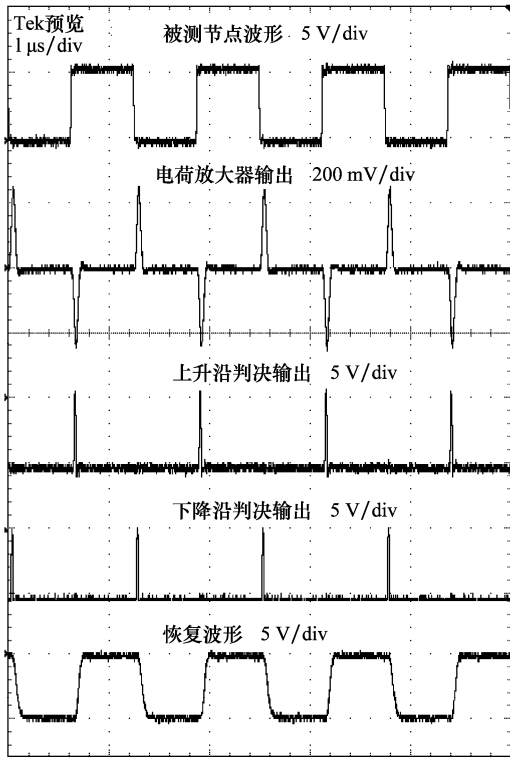


图 10 信号恢复过程中若干关键波形

图 11 是恢复  $20 \text{ MHz}$  数字信号的效果, 原始信号与输出信号之间存在  $20 \text{ ns}$  左右的延迟, 该延时主要取决于上下边沿检测中的延时和 RS 触发器的延时, 当元器件参数确定后, 系统延迟将是固定值。

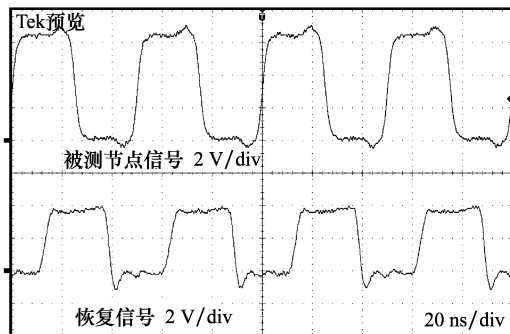


图 11  $20 \text{ MHz}$  数字信号恢复结果

## 4 结 论

本文提出了一种数字电路的非接触式测试方法, 以解决探针寿命、测试可靠性和安全性等问题。通过对探测天线的电路等效模型分析, 提出以电荷放大器替代 LNA 对天线信号进行放大, 再通过提取数字信号的上升/下降沿时刻的方法恢复原始信号的方法。分析了节点间串扰问题并给出了判决门限的选取方法。实验结果验证了方法的有效性, 可恢复的数字信号带宽满足 TTL/CMOS 逻辑门电路测试的需要, 具有固定的延迟, 可用于通用数字逻辑电路板的测试。

## 参考文献:

- [1] Millard D L, Umstadter K R, Block R C. Noncontact testing of circuits via a laser-induced plasma electrical pathway[J]. *Design & Test of Computers*, 1992, 19(1): 55 - 63.
- [2] Umstadter K R, Millard D, Block R. When air becomes an electrical pathway[C]// *IEEE International Conference on Plasma Science, IEEE conference Record-Abstracts*, 1997: 125 - 126.
- [3] Umstadter K R, Millard D L, Block R C. Applications of a laser-induced plasma pathway to testing of electronic modules[J]. *Design & Test of Computers*, 1993, 10(1): 67 - 72.
- [4] Sellathamby C, Reja M. Noncontact wafer probe using wireless probe cards [C] // *IEEE International Conference on Test*, 2005: 1 - 6.
- [5] Sugavanam A, Lin J J, Jie C, et al, On-chip antennas in silicon ICs and their application[J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2005, 52(7): 1312 - 1323.
- [6] Lin J J, Wu H T, Su Y, et al. Communication using antennas fabricated in silicon Integrated circuits [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2007, 42(8): 1678 - 1687.
- [7] Piljae P, Patrick Y C. A feasibility study of on-wafer wireless testing [C] // *Proc. of International Symposium on VLSI Design, Automation, and Test*, 2008: 299 - 302.
- [8] Zhao D, Upadhyaya S, Margala M. A new SoC test architecture with RF/wireless connectivity [C] // *Proc. of the 10th IEEE European Symposium on Test*, Washington: IEEE Computer Society, 2005: 14 - 19.
- [9] Wang Y, Niknejad A M, Gaudet V, et al. A CMOS IR-UWB transceiver design for contact-less chip testing applications [J]. *IEEE Trans. on Circuits Systems-II: Express Briefs*, 2008, 55(4): 334 - 338.
- [10] Gil-Su Kim, Makoto Takamiya, Takayasu Sakurai. A 25-mV-sensitivity 2-Gb/s optimum-logic-threshold capacitive-coupling receiver for wireless wafer probing systems [J]. *IEEE Trans. on Circuits Systems II: Express Briefs*, 2009, 56(9): 709 - 713.
- [11] Fleming A J, Moheimani S O R. A grounded-load charge amplifier for reducing hysteresis in piezoelectric tube scanners [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(7): 073707 - 1 - 5.