

文章编号: 2095-4980(2019)05-0924-04

一种新型三极管取样门电路设计

石国伟^{a,b}, 肖建^{a,b}, 夏天^{a,b}, 郭宇锋^{*a,b}, 王吉^{a,b}, 程景清^{a,b}

(南京邮电大学 a.电子科学与工程学院; b.射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 超宽探地雷达在无损检测系统中应用越来越广泛, 采样电路是整个无损系统设计的关键。基于等效采样原理设计出一款新的三极管取样门电路。该电路克服了现有二极管取样门电路的缺点, 很好地实现采样保持。利用先进设计系统(ADS)软件对该取样门电路进行仿真, 输入脉冲重复频率为 10 MHz 的 2 ns 三角波信号, 采样时钟重复频率为 10 MHz 且与被采样信号有 100 ps 延时差。对其进行采样, 经过该取样门电路后, 输出信号为 2 μ s。在聚四氟乙烯板上实现该电路, 利用信号发生器输入一个 90 ns 的正弦波作为被采样信号, 采样时钟为 100 ns, 经过该取样门电路后, 输出信号周期为 1 μ s。实测与理论结果都表明该电路可以降低输入信号的频率, 实现利用低速 A/D 对高速信号的数据采集, 大大降低了整个系统的成本。

关键词: 超宽带; 探地雷达; 等效采样

中图分类号: TN703

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0924

A novel design of triode sampling gate circuit

SHI Guowei^{a,b}, XIAO Jian^{a,b}, XIA Tian^{a,b}, GUO Yufeng^{*a,b}, WANG Ji^{a,b}, CHENG Jingqing^{a,b}

(a.College of Electronics Science and Engineering; b.National Local Joint Engineering Laboratory of Radio Frequency Integration and Micro Assembly Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210023, China)

Abstract: Ultra-wide ground penetrating radar has been more and more widely used in the non-destructive testing system, and the sampling circuit is the key to the whole non-destructive system design. A new triode sampling gate is proposed based on equivalent sampling principle. The circuit overcomes the shortcomings of the existing diode sampling gate circuit and can well achieve sample-and-hold. Using Advanced Design System(ADS) software to simulate the sampling gate, 2 ns triangular wave with 10 MHz of pulse repetition frequency is input, and a sampling pulse signal with the sampling clock repetition frequency of 10 MHz and a 100 ps delay difference with the sampled signal is utilized. After the sampling gate, the output signal is 2 μ s. This circuit is implemented on FR4, and a 90 ns sine wave is input as a signal to be sampled by using a signal generator. The sampling clock is 100 ns, and the signal period after the sampling gate is 1 μ s. The measured and theoretical results show that the circuit can reduce the frequency of the input signal, therefore it can use low-speed A/D to acquire high-speed signal, which greatly cut the cost of the entire system.

Keywords: ultra-wideband; ground penetrating radar; equivalent sampling

近年来, 超宽带脉冲雷达作为一种无损检测技术广泛用于反恐、搜救、安检等领域^[1-3]。由于接收信号是超宽带信号, 其脉宽窄, 频带宽。受采样定理限制, 对于超宽带脉冲采样, 如信号的脉冲宽度为 1 ns, 往往需要采样率大于 2 GHz 的高速集成 A/D 芯片或高速采样设备。而目前 2 GHz 采样率的集成 A/D 芯片成本很高; 高速采样设备也存在成本高, 体积较大等缺点。但如果采用等效采样技术, 便会极大地降低整个采样系统的成本。目前取样门电路主要有平衡取样门、双管取样门、桥式取样门。平衡取样门在实际应用中存在很多问题, 如赫兹偶极子天线与回波信号是否完全对称, 差分放大能否达到要求, 因此平衡取样门仅停留在仿真阶段^[4]; 双管取样门和桥式取样门工作原理与平衡取样门类似, 同样采用二极管作为取样器件, 不同的是回波输入不

收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61874059)

*通信作者: 郭宇锋 email:yfguo@njupt.edu.cn

需要经过双极性转换。但在实际应用中, 保证取样脉冲和双管电路的对称性是电路正常工作的关键, 因此需严格控制整个系统的对称性^[5-7]。为此, 本文设计出一种新的取样门电路, 克服了现有取样门电路的缺点。利用该电路, 可以实现低速 A/D 对高速信号的采样, 大大降低了整个超宽带无损检测系统的成本。采用安捷伦公司的仿真软件 ADS 对该取样门进行仿真, 输入 2 ns 三角波, 经过该系统后周期为 2 μ s; 并将该电路在聚四氟乙烯板上进行实测, 实测结果与理论分析一致。这种电路结构简单, 易于集成, 噪声系数小, 且微弱信号检测优势明显, 适用于超宽带脉冲信号的采集。

1 取样门电路设计

在超宽带无损检测系统中, 取样门和取样电路是整个系统的关键。利用取样脉冲信号控制取样门的开关, 可以实现对输入信号的等效采样^[8-11]。由于二极管取样门电路在保持阶段有较大的馈通问题, 因此本文设计出一种新的三极管取样门电路, 结合文献[3]设计的雪崩晶体管取样脉冲产生方法, 实现等效采样。

图 1 为采样保持电路的基本模型。取样门是取样脉冲形成的一个理想开关电路, 当开关打开时, 被采样信号被电容 C_s 存储; 当开关关闭时, 信号被电容 C_s 保持。

由于三极管具有开关特性, 且共集极电路结构有:

$$I_b = I_e / (1 + \beta) \quad (1)$$

$$A_u = \frac{(1 + \beta)R_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_L} \approx 1 \quad (2)$$

式中: I_b, I_e 为三极管基极、集电极电流; β 为三极管电流放大系数; A_u 为电压放大倍数; r_{be}, R_L 为基射电阻、负载电阻。因此选用三极管结构可以有效防止、克服文献[4-7]中的二极管取样门电路的馈通问题。

根据分析, 可设计出如图 2 所示的取样电路, 主要由 3 部分构成: 直流偏置电路、取样门电路、缓冲电路。与二极管取样门相比, 直流偏置电路对三极管电路影响更为重要, 本设计中直流偏置电路由 $R_6, R_7, R_{10}, R_{11}, C_4$ 组成。通过调节电阻 R_6 , 可以控制三极管 Q_1, Q_2, Q_3 的发射极电压, 从而调节整个取样门的直流偏置。由于在保持阶段, 输入信号由 Q_2 经过 R_6 到地, 为了防止输入信号向后级馈通, R_6, R_7 的值不宜过大, 选用 27 Ω , 且 R_7 与 C_4 并联, 有利于信号的释放到地, 防止在保持阶段向后级馈通。

取样门电路由 Q_4 集电极输出信号和基集输入信号控制 Q_1, Q_2, Q_3 构成。ps 级取样脉冲经过 Q_4 集电极输出, 得到一个相位相反的 ps 级脉冲信号, 这样就得到一对相位相反的取样保持脉冲。通过调节电阻 R_8, R_9 实现对取样脉冲幅度的调节:

$$A_u = -\frac{\beta R_L}{r_{be}}, R_L = \frac{R_8 R_9}{R_8 + R_9} \quad (3)$$

当输入信号为低电平时, Q_3 导通, Q_2 截止, 此时 Q_1 处于导通状态。 Q_1 导通时, 对 C_3 充放电, 实现采样。同理, 当 Q_2 导通, Q_3 截止, 此时 Q_1 截止时, C_3 处于保持状态。这样便可以实现对整个被采样信号的跟踪保持。此时 C_3, R_2 的选择尤为重要, C_3 太大, 充放电效果不明显; C_3 太小, 则会导致被采样信号保持不住。 R_2 的阻值不宜太大, 太大导致充放电受阻。 C_3 为 47 pF, R_2 为 300 Ω 。

为了防止保持电容上的保持信号向后级放电, 在保持电容后采用高性能的绝缘栅型场效应晶体管(Junction Field-Effect Transistor, JFET)结合电阻 R_3 形成一个高输入阻抗、低输出阻抗的缓冲电路。JFET 与 MOSFET 相比, 无需开启电压, 因此在微弱信号采样时比 MOSFET 更具有优势。此外 R_3 可以取大些的阻值, $R_3=1\ 000\ \Omega$ 。

根据取样桥的设计分析可知, 电路共分为 3 部分, 其中取样电路中选取恩智浦公司生产的 NPN 型晶体管 BUF630F, 它是一种低噪声、高速晶体管。其特征频率 $f_T=21\ \text{GHz}$, 集电极—发射集雪崩击穿电压 $U_{CEO}=5.5\ \text{V}$, 集电极—基级雪崩击穿电压 $U_{CBO}=16\ \text{V}$, 完全可以满足 1 GHz 的被采样信号的取样门设计要求。

2 系统仿真分析

采用安捷伦公司仿真软件 ADS 对取样门电路进行仿真, 电路中的器件采用 ADS 中的 spice 模型, 并用 2 ns, 500 mV 的三角波作为被采样信号, 对取样门电路进行验证。

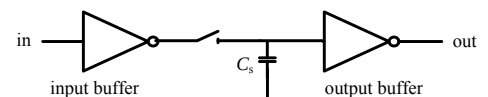


Fig.1 Basic model of sample-and-hold circuit
图 1 采样保持电路基本模型

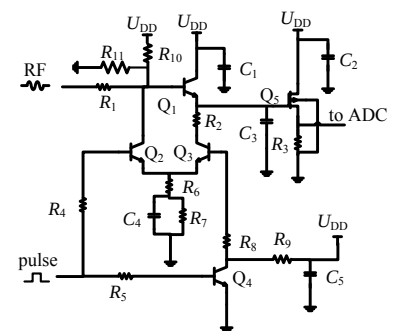


Fig.2 Transistor sampling circuit
图 2 三极管取样电路

如图 3 所示, 2 ns 的被采样信号经过三极管取样门拉长到 2 μs , 整个被采样信号的频率降低了 1 000 倍。取样门的输出波形脉冲宽度为 2 μs , 幅度约 300 mV, 输出脉冲的幅度衰减 200 mV 左右。仿真结果充分证明了该设计的合理性。结合该取样门, 完全可以利用低速 A/D 实现对高速信号的采样。同时输出信号仍有一定的过冲现象, 这是由电容充放电瞬间的电压变化引起的, 经过差分放大电路完全可以消除。

表 1 给出了相关文献中各种取样门电路的仿真性能参数对比。由表 1 可以看出, 平衡取样桥电路结构简单, 但需要 2 个输入信号, 文献[10-11]中利用赫兹偶极子天线, 仍停留在仿真阶段; 双管取样桥电路和桥式取样桥只需要输入信号, 但信号幅度衰减严重, 对微弱回波检查相对困难。本文设计的取样门电路结构简单, 且信号衰减较小, 有利于小信号的采集。

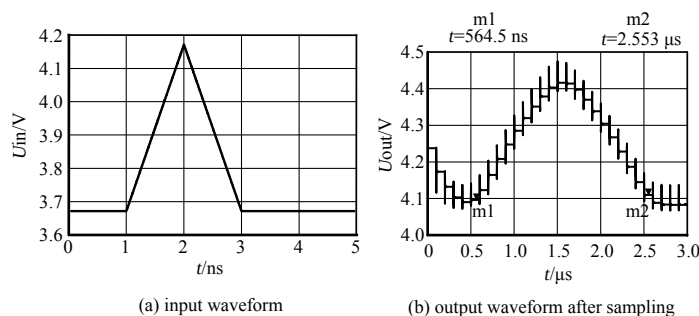


Fig.3 Sample bridge output signal after sampling

图 3 采样后取样桥输出信号

3 系统测试

如图 4 所示, 取样电路制作在介电常数为 4.3、厚度为 1.6 mm 的聚四氟乙烯(FR4)板材上, 大小为 16 cm×6 cm。

板材主要分为 4 层, 上层和下层主要走信号线, 中间层主要为电源和地线。此外在高频布线时, 为减小线间串扰, 应尽量避免平行走线。同时, 为避免小信号和微弱信号被强电源信号干扰, 除了缩短信号线的走线, 还需对部分线路周围做地隔离。

在电路板测试中, 整个取样电路采用 8 V 直流电源供电, 输入信号用 Tektronix 公司的 AFG3152C 信号发生器产生 90 ns, 400 mV 正弦信号作为被采样信号, 采样信号由 10 MHz 晶振产生, 经过取样脉冲产生电路产生采样间隔为 100 ns 的取样脉冲。经过可调节延时芯片延时对输入信号进行延时可调^[12-15]。

如图 5 所示, 90 ns 正弦信号经过采样系统可以对该电路实现等效采样。采样后信号周期为 1 μs , 频率约降低了 10 倍。实测与理论仿真分析一致, 因此可以将该系统用在超宽带信号采集中。同时输出信号在保持阶段输出电压有轻微的下降, 这是由于保持电容对后级有部分漏电导致。因此在实测中还要对系统的输出阻抗与保持电容的值进一步优化, 以提高电路的性能。

4 结论

本文基于等效采样原理设计出一种新的取样门电路, 该取样门克服了传统取样门电路的缺点, 且结构简单, 易于集成。随着射频晶体管特征频率的不断提高, 该取样门电路可用在更高频率的采样系统中, 大大降低整个超宽带无损检测系统的成本。

表 1 等效采样取样桥性能比较

Table1 Performance comparison of equivalent sampling bridges

sampling circuit	input	output
balanced structure/V	4	1
double tube construction/V	1.00	0.35
bridge structure/V	2.50	0.28
this paper/mV	500	300

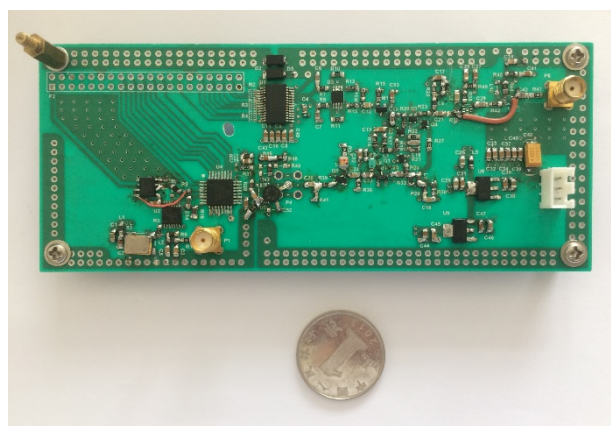


Fig.4 Sampling circuit test board

图 4 取样电路测试板

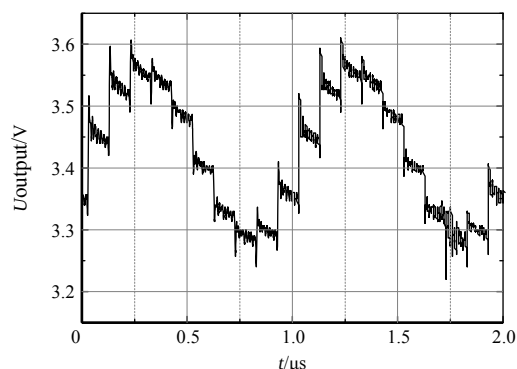


Fig.5 Measured output waveform

图 5 实测输出波形

参考文献：

- [1] PAGLIERONI D W, CHAMBERS D H, MAST J E, et al. Imaging modes for ground penetrating radar and their relation to detection performance[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2015, 8(3): 1132–1144.
- [2] YANG K, TIAN S, SONG J. A high speed random equivalent sampling method based on time-stretch[C]// International Symposium on Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation. Toronto, ON, Canada: IEEE, 2013: 159–162.
- [3] 成彬彬, 李慧萍, 安健飞, 等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(6): 843–848. (CHENG Binbin, LI Huiping, AN Jianfei, et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(6): 843–848.)
- [4] 郭宇, 朱国富. 超宽带穿墙雷达取样脉冲产生器设计[J]. 电讯技术, 2014, 54(9): 1280–1285. (GUO Yu, ZHU Guofu. Design of a novel sampling pulse generator for ultra-wideband through wall radar[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9): 1280–1285.)
- [5] 刘博. 微小型超宽带收发技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014. (LIU Bo. Research on micro-ultra-wideband transceiver technology[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2014.)
- [6] SHAO W, BOUZERDOUM A, PHUNG S L. Signal classification for ground penetrating radar using sparse kernel feature selection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(12): 4670–4680.
- [7] HAN J, HUYNH C, NGUYEN C. Tunable monocycle pulse generator using switch controlled delay line and tunable RC network for UWB systems[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Toronto, ON, Canada: IEEE, 2010: 1–4.
- [8] BALLAL T, AL-NAFFOURI T Y. Low-sampling-rate ultra-wideband channel estimation using equivalent-time sampling[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(18): 4882–4895.
- [9] YANG J, LIU S, ZHU C, et al. Equivalent sampling oscilloscope with external delay embedded system[C]// IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications. Banff, AB, Canada: IEEE, 2011: 195–201.
- [10] WANG S S, CHAI S L, XIAO K, et al. Simulation study on RFI signal in impulse UWB radar system with equivalent time sampling[C]// 12th International Conference on Signal Processing. Hangzhou, China: IEEE, 2015: 2145–2148.
- [11] LIU Q, WANG Y, FATHY A E. A compact integrated 100 GS/s sampling module for UWB see through wall radar with fast refresh rate for dynamic real time imaging[C]// IEEE Radio and Wireless Symposium. Santa Clara, CA, USA: IEEE, 2012: 59–62.
- [12] 郭宜龙. 探地雷达脉冲源和数据采集系统[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. (GUO Yilong. Ground penetrating radar pulse source and data acquisition system[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.)
- [13] MORENO-GARCIA E, ROSA-VAZQUEZ J M D L, ALONZO-LARRAGA O. An approach to the equivalent-time sampling technique for pulse transient measurements[C]// International Conference on Electronics, Communications and Computers. Puebla, Mexico, Mexico: IEEE, 2006.
- [14] SANDRING F, ALLROGGEN N, TRONICKE J. A physical modeling study to analyze the horizontal resolution limits of GPR reflection imaging[C]// International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. Edinburgh, UK: IEEE, 2017: 1–5.
- [15] ZHAO D, SERDIJN W A. A time-interleaved sampling delay circuit for IR UWB receivers[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2009: 233–236.

作者简介：



石国伟(1991–)，男，江苏省泰州市人，在读硕士研究生，主要研究方向为超宽带数据采集技术。email: 826203476@qq.com.

王吉(1992–)，男，南京市人，在读硕士研究生，主要研究方向为超宽带探地雷达控制系统。

程景清(1956–)，男，山东省青岛市人，高级工程师，主要研究方向为射频电路设计。

肖建(1976–)，男，江苏省常州市人，博士，副教授，主要研究方向为嵌入式系统。

夏天(1971–)，男，南京市人，博士，教授，主要研究方向为超宽带探地雷达。

郭宇锋(1975–)，男，河南省洛阳市人，博士，教授，主要研究方向为功率器件与射频集成电路设计。