

# 新型超宽带脉冲探地雷达接收机的设计与研制

刘丽华<sup>1,2</sup>, 周 斌<sup>1</sup>, 方广有<sup>1</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 基于等效时间采样原理, 提出了一种新型超宽带脉冲探地雷达接收机的设计方法, 并研制了实用的超宽带接收机模块, 其关键电路包括皮秒级采样脉冲产生电路、肖特基二极管平衡取样门、信号保持与放大电路以及微带魔 T 结构。该接收机的采样带宽为 4 GHz, 与理论计算值相一致, 采样效率高达 40%。实验测试表明, 接收机等效采样后重建的基带信号波形与原始微波信号形状吻合度好, 证明该接收机具有良好的超宽带特性, 满足脉冲探地雷达回波信号接收要求。

**关键词:** 探地雷达; 超宽带接收机; 采样电路; 毫微秒脉冲; 超宽带系统

**中图分类号:** TN 957

**文献标志码:** A

## Design and realization of a novel ultra-wideband receiver for impulse ground penetrating radar systems

LIU Li-hua<sup>1,2</sup>, ZHOU Bin<sup>1</sup>, FANG Guang-you<sup>1</sup>

(1. Inst. of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate Univ. of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The design method of a novel ultra-wideband (UWB) receiver for impulse ground penetrating radar systems is described, and the practical circuit of the UWB receiver is implemented. The basic principle of the receiving signal is equivalent-time sampling. The key circuits of the receiver include the pulse generator on a picosecond level, the Schottky diode balanced sampling gate, holding and amplifier circuit and the magic-T hybrid. The sampling bandwidth of the receiver is 4 GHz, which agrees with the calculated value, and the sampling efficiency is as high as 40%. The experimental results show that the shape of the base band signal after equivalent-time sampling agrees very well with the original microwave signal, thus validating the good performance of the ultra-wideband receiver. Therefore, the UWB receiver meets the requirements to receive the echo signal of the ultra-wideband impulse ground penetrating radar.

**Keywords:** ground penetrating radar; ultra-wideband receiver; sampling circuit; nanosecond pulse; ultra-wideband system

## 0 引言

探地雷达是一种利用电磁波探测地下介质分布和地下物体埋藏情况的无损探测技术, 与其他方法相比, 具有探测速度快、分辨率较高等优点, 被广泛应用于地质勘察、工程质量检测等众多领域。已经产品化的探地雷达基本上都是采用无载频毫微秒脉冲信号体制, 发射机结构差别不大, 基本上是基于雪崩三极管或阶跃恢复二极管等原理产生幅度为数伏特至千伏特量级、宽度零点几纳秒至数纳秒的脉冲信号。脉冲幅度和宽度的大小取决于探测深度和分辨率, 大幅度宽脉冲发射机用于深层目标探测, 小幅度窄脉冲

用于浅层高分辨率探测。与发射机不同, 接收机的技术实现途径和电路形式较多。工程实践表明, 接收机性能往往是决定探地雷达系统能力的核心因素。另一方面, 无载频脉冲探地雷达的发射信号为皮秒或纳秒量级脉冲信号, 如果直接对回波信号进行采集, 将对 A/D 转换器的转换速率要求极高, 不仅成本高, 而且在信号中心频率大于 500 MHz 时实现难度极大, 甚至是不能实现的。为了解决该矛盾, 无载频脉冲探地雷达接收机一般都是采用等效采样方法来实现。

基于等效采样原理的超宽带接收机需包含取样门电路, 常见的取样门<sup>[1-2]</sup>通常由肖特基二极管组成双管对称结

收稿日期: 2008-12-11; 修回日期: 2009-08-09。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA12Z124); 国家自然科学基金(60551002)资助课题

作者简介: 刘丽华(1981-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为超宽带成像雷达技术。E-mail: liulihualook@126.com

构或四管桥式结构。取样脉冲信号的宽度通常为皮秒量级,为了保障对称结构取样门电路能够可靠地工作,需要产生正负完全对称的两路取样脉冲信号控制取样门的快速开启与关断。Reisen Zahn 和 Buchegger 提出利用取样相位检测器(sample phase detector, SPD)设计超宽带脉冲接收机<sup>[3-4]</sup>,并对 UWB 脉冲信号进行了接收实验,但是该接收机重建后的低频信号与原始 UWB 脉冲形状一致性较差。其主要原因是:该接收机利用差分运算放大器得到一对平衡的取样脉冲信号,由于差分运算放大器的工作带宽有限,无法高效地将单个窄脉冲信号转化为一对完全对称的平衡信号,导致接收机取样脉冲信号的对称性较差。采用传统的变压器方法<sup>[5]</sup>也很难保证正负取样脉冲的对称性,同时变压器在将单脉冲转换为对称脉冲时不仅能量损耗大,而且脉冲宽度也会被展宽,导致采样转换效率降低,取样带宽减小。本文设计的超宽带接收机将阶跃恢复二极管取样脉冲产生电路、微带魔 T 结构以及取样门电路三者有机结合,克服了取样脉冲对称性差,能量损耗大的问题,设计新颖,结构小巧,采样效率为 40%,取样带宽高达 4 GHz,可以应用到各种超宽带雷达系统中。

### 1 超宽带雷达系统组成

由于受 A/D 数据处理速度的限制,实时采样只适用于频率相对较低的信号,例如小于 500 MHz;对于微波信号,如果信号具有可重复性,则可利用等效采样方法实现低成本地接收,即在每个重复周期内进行适量次数(一般为一次)的采样,然后综合所有采样,合成完整的输入信号。等效采样有效地降低了研制高速 A/D 采集电路的难度。图 1 为基于等效取样原理的超宽带脉冲雷达系统结构框图。发射机发射无载频纳秒或皮秒脉冲信号,接收机利用等效采样原理对雷达回波信号进行等效采样,将纳秒或皮秒脉冲信号在时间轴上展宽成毫秒量级或微秒量级基带脉冲信号。

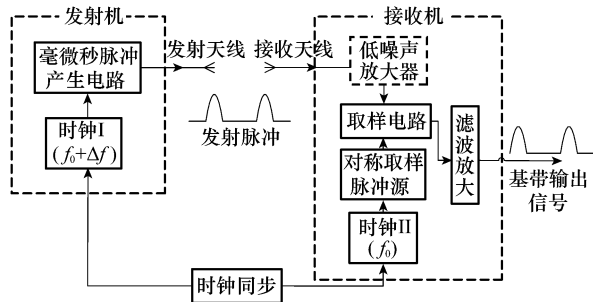


图 1 等效采样超宽带脉冲雷达系统框图

### 2 接收机设计

图 2 为本文设计的接收机电路简图,其取样门电路<sup>[6]</sup>由肖特基采样二极管 D1 和 D2、保持电容 C1 和 C2 以及保持电阻 R1 和 R2 组成。当一对极性相反幅度相同的取样窄脉冲信号 pulse+ 与 pulse- 通过电容 C1 和 C2 耦合至肖

特基二极管时,二极管同时导通,取样门迅速打开,微波信号对保持电容 C1 和 C2 充电。极短的取样脉冲结束后,肖特基二极管迅速截止,存储于电容 C1 和 C2 上的电荷通过电阻 R3 和 R4 放电,将电容 C1 和 C2 上集聚的电荷转移至 C3 上,对微波信号进行取样积分,使 C3 两端电压与微波输入信号电压成一定比例,并反映了微波信号电压的大小和变化。

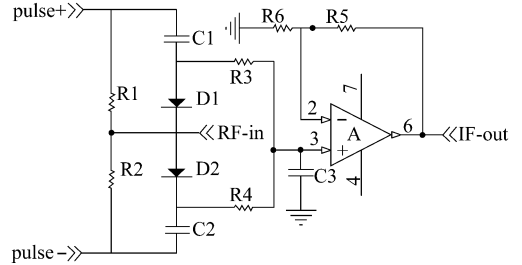


图 2 接收机取样电路

图 2 中的 pulse+ 与 pulse- 为对称取样脉冲,由脉冲信号源经过微带魔 T 结构得到。脉冲信号产生电路<sup>[7-9]</sup>如图 3 所示,其中前级运算放大器作为 Buffer 增加对后级电路的电流驱动能力,D 为阶跃恢复二极管。经实测,该取样脉冲电路输出的脉冲波形如图 4 所示,脉冲宽度(10% - 10%)为 500 ps,幅度为 5 V。该取样存在较小的拖尾,由于低频成分在微带魔 T<sup>[10]</sup>结构中能量耦合较小,所以该拖尾不会对取样电路造成影响。

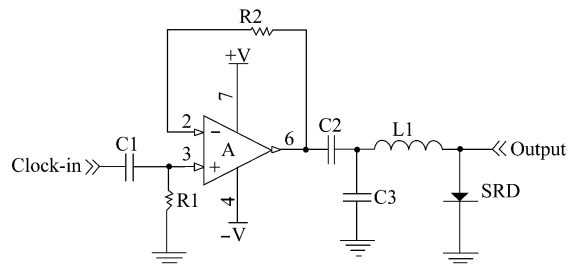


图 3 取样脉冲产生电路

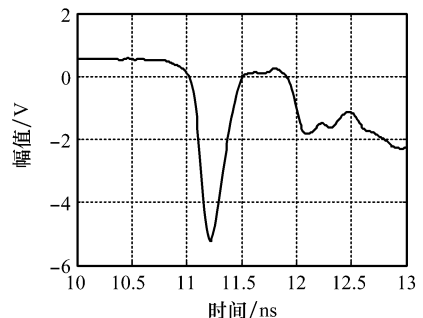


图 4 取样脉冲电路输出波形

本文研制完成的接收机电路实物如图 5 所示,其特点是将阶跃恢复二极管取样脉冲产生电路、微带魔 T 结构以及取样门电路集成在一块微波电路板上,结构紧凑,成本较低。

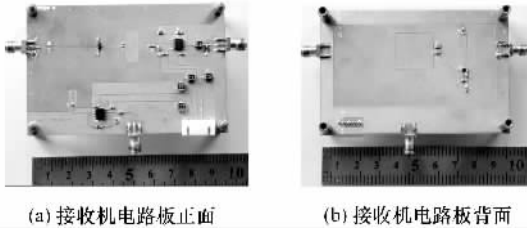


图5 接收机电路

### 3 接收机取样带宽仿真分析

在理论上,通过分析肖特基二极管的开关特性<sup>[11]</sup>,可以计算得到接收机的取样带宽,取样门电路中肖特基二极管的等效电路如图6所示,其中 $C_j$ 和 $R_d$ 分别为二极管的结电容和结电阻, $R_s$ 表示二极管的串联电阻, $L_p$ 和 $C_p$ 分别为二极管的引线电感和引线电容。

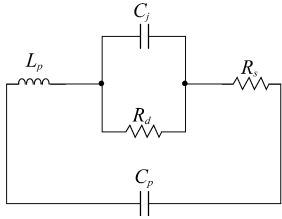


图6 肖特基二极管等效电路

根据本文所用肖特基二极管特性,仿真参数选为: $R_d = 14 \Omega$ ,  $R_s = 6 \Omega$ ,  $C_j = 0.2 \text{ pF}$ 。定义有效取样时间  $T_s = \sqrt{t_r^2 + t_a^2}$ ,其中  $t_r$  为射频信号给肖特基二极管充电的上升时间,  $t_a$  为取样缝隙时间。由于  $t_r$  很小可以忽略不计,  $T_s \approx t_a$ ,本系统中  $t_a$  大约为  $70 \text{ ps}$ 。增益转换曲线可以表示为

$$\frac{V_{C_h}}{V_{RF}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega T_s}{2.2}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{1 + (\omega R_d C_j)^2}{(1 - \omega^2 R_s C_h R_d C_j)^2 + \{\omega [R_s C_h + R_d (C_h + C_j)]\}^2}} \quad (1)$$

式中, $C_h$ 和 $R_h$ 分别为接收机取样电路中的保持电容和保持电阻。将相关参数代入式(1),可计算得到本文设计的接收机的增益转换曲线如图7所示。可见,该接收机的3 dB带宽约为4.7 GHz。

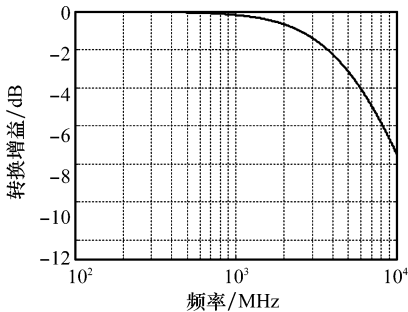


图7 接收机增益转换计算曲线

### 4 超宽带接收机性能测试与分析

接收机性能测试主要是对比分析接收机信号重建得到的基带信号与原始脉冲信号波形的一致性和转换效率或转换增益<sup>[12]</sup>,测试实验如图8所示。路径1为脉冲发生器产生的脉冲信号直接接入示波器通道1。路径2则是利用接收机接收来自脉冲发生器的脉冲信号,经接收机采样电路后再接入示波器通道2。测量中所用示波器为 Tek TDS6804 数字实时示波器,实时带宽为 8 GHz。

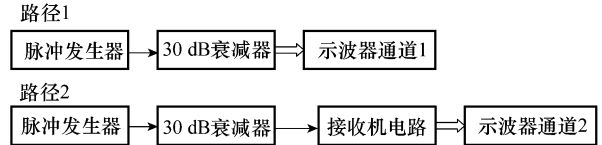
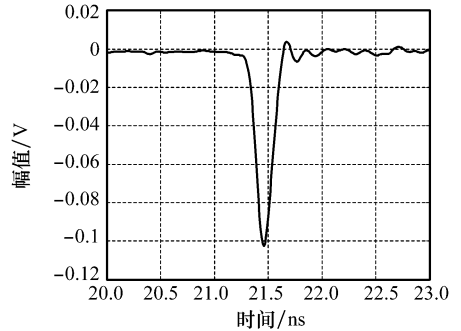
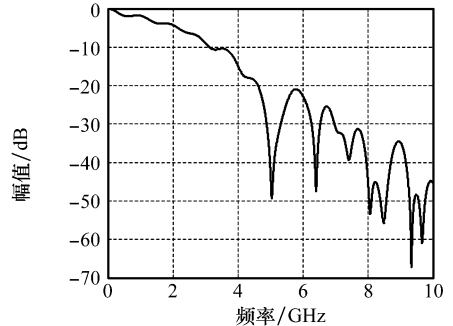


图8 接收机系统实验测试框图

脉冲发生器为本实验室研制,产生的窄脉冲信号重复频率为 10 MHz,脉冲底宽 400 ps,幅度为 4 V,通过 30 dB 衰减器后接入示波器通道 1,其时域波形及其频谱如图 9(a)和图 9(b)所示。



(a) 脉冲信号波形



(b) 脉冲信号对应的频谱

图9 脉冲信号及其对应的频谱

上述窄脉冲信号通过本文研制的接收机接收后,得到的基带信号输出波形如图10所示。通过图10与图9(a)脉冲波形的对比可看出,皮秒脉冲信号经等效采样后在时间轴上被拉伸,重复周期由原来的 100 ns 拉伸为 1 ms,脉冲宽度由原来的 400 ps 拉伸为 4  $\mu\text{s}$ ,采样效率高达 40%。波形尾部略有一点形变,主要是由于取样门电路中肖特基

二极管的开关速度不够快造成的。采样后的重建信号波形与原始脉冲波形的一致性很好,说明该接收机系统具有良好的超宽带特性。

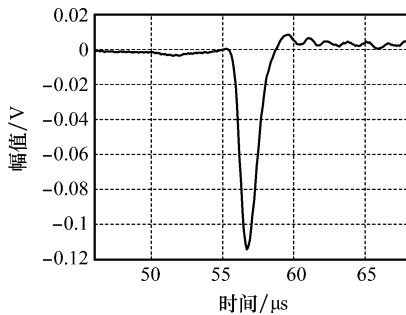


图 10 等效采样接收后的基带信号波形

利用信号源 Agilent E8257D 产生 0 Hz~7 GHz 的正弦信号,接入接收机进行等效采样,经过实验测量,该接收机的增益转换(有放大器)曲线如图 11 所示,可知该接收机的 3 dB 带宽约为 4 GHz,与式(3)的计算值基本相符。经过进一步的实验测量,可知该接收机的动态范围为 50 dB,灵敏度为 -40 dBm。

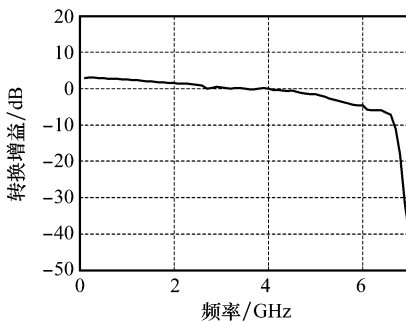


图 11 接收机转换增益测量曲线

## 5 结 论

基于等效采样原理,本文着重讨论了超宽带脉冲探地雷达接收机的工作原理、电路设计及其实现方法。本文研制的接收机最大的特点是将取样脉冲产生电路、微带魔 T 结构以及取样电路三者巧妙结合,制作在一块电路板上,结构紧凑,成本低廉。实测结果表明,本文设计的超宽带接收机取样带宽可达 4 GHz,能够很好地重建与原始回波信号形状高度一致的基带信号,有利于后端

电路的 A/D 转换和信号处理,对实际的工程应用有较好的参考价值。

## 参考文献:

- [1] Chen Yuxiao, Yin Xiandong. Design and simulation of 100 ps transient sampling gate based on high speed Schottky diode[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006,18(1):45-50.
- [2] Zhang Ceming, Fathy Aly E. Performance enhancement of a sub-sampling circuit for ultra-wideband signal processing[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(2):873-875.
- [3] Reizenzahn A, Buchegger T, Kaineder G. Phase synchronization in UWB receivers with sampling phase detectors[C]// *IEEE MTT-S, International Microwave Symposium Digest*, 2005: 1887-1890.
- [4] Reizenzahn A, Buchegger T, Kaineder G. A ground penetrating UWB radar system[C]// *IEEE MTT-S, Ultra-wideband and Ultra-short Impulse Signals*, 2006:116-118.
- [5] 周维,王赤,田茂,等.基于等效时间采样的探地雷达回波信号采样方法研究[J]. *雷达科学与技术*,2004,2(1):43-47.
- [6] Lee J S, Nguyen C, Scullion T. A novel compact. Low-cost impulse ground penetrating radar for nondestructive evaluation of pavements[J]. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(6):1502-1509.
- [7] Han J W, Nguyen C. On the development of a compact sub-nanosecond tunable monocycle pulse transmitter for UWB applications[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(1):285-293.
- [8] Han J W, Nguyen C. Development of a tunable multiband UWB radar sensor and its applications to subsurface sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(1):51-58.
- [9] Yilmaz Sertac, Tekin I. Ultra-wideband N-bit digital tunable pulse generator[J]. *IEEE Microwave and Optical Technology Letters*, 2006,48(7):1334-1339.
- [10] 高翔,程崇虎.一种新型微带/槽线混合结构的宽带魔 T[J]. *微波学报*,2005,21(4):12-15.
- [11] Han J W, Nguyen C. Integrated balanced sampling circuit for the ultra-wideband communications and radar systems[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, 14(10):460-462.
- [12] Yan Ming, Tian Mao, Gan Lu. Impulse ground penetrating radar hardware system design[C]// *Proc. of 6th International Conference on ITS Telecommunications*, 2006:1244-1247.