

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.020

引用格式: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 Guo-fu.Design of a Novel Sampling Pulse Generator for Ultra-Wideband Through-Wall Radar[J].Telecommunication Engineering,2014,54(9):1280-1285.]

超宽带穿墙雷达取样脉冲产生器设计*

郭宇**,朱国富

(国防科技大学 电子科学与工程学院,长沙 410073)

摘要:在超宽带穿墙雷达接收机系统中,其关键的等效采样技术需要一种极窄脉宽高电压的脉冲触发采样门电路来对接收信号进行采样。介绍了超宽带取样脉冲产生技术,讨论并分析了几种常用超宽带脉冲产生方法的特点及其局限性。提出了新型的肖特基二极管脉冲整形网络,设计并实现了应用于等效采样接收机系统的新型亚纳秒取样脉冲产生器,很好地结合了雪崩晶体管与脉冲整形网络的优势,在显著减小脉宽的同时保持了较高的脉冲幅度。通过仿真分析和制作测试,获得了脉冲底宽为400 ps、幅度为6.46 V和波动水平为-14.7 dB的单极性窄脉冲,实测结果与设计数值一致性良好。这种简单高效廉价的电路十分符合超宽带穿墙雷达等效采样接收机取样脉冲的设计。

关键词:超宽带;穿墙雷达;取样脉冲产生器;等效采样;雪崩晶体管;肖特基二极管

中图分类号:TN782 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)09-1280-06

Design of a Novel Sampling Pulse Generator for Ultra-Wideband Through-Wall Radar

GUO Yu,ZHU Guo-fu

(School of Electronic Science and Engineering,National University of Defense Technology,Changsha 410073,China)

Abstract:In the receiver of through-wall radar,equivalent sampling technology is the key technology which requires a narrow and high-amplitude pulse to trigger the sampling gate for sampling. In this paper,the ultra-wideband(UWB) pulse technologies are described,and then different approaches for generating UWB pulse are analyzed and compared. The considered pulse generation technologies are based on logic gates, Step-Recovery Diodes(SRD) and avalanche transistors. Furthermore,a novel approach for the sub-nano-second sampling pulse generator of the equivalent sampling receiver is investigated. The basis of the generator is an avalanche transistor and a unique pulse-shaping circuit,which is composed of the Schottky diode and used to reduce the pulse width and maintain the higher pulse amplitude. Finally,the sampling pulse generator with pulse duration of 400 ps,pulse amplitude of 6.46 V and ringing level of -14.7 dB is simulated and fabricated. Good agreement between the measured and simulation results is achieved. With the features such as simple structure,stable performance and low cost,the proposed design is ideal for the sampling pulse of the UWB equivalent sampling receiver.

Key words:UWB;through-wall radar;sampling pulse generator;equivalent sampling;avalanche transistor;Schottky diode

1 引言

近年来,超宽带穿墙雷达成为国内外学者研究的热点,其主要用于反恐、安检和搜救等领域。鉴于国内不容乐观的反恐形势,加强对穿墙雷达的研究

就变得十分重要了。对超宽带穿墙雷达接收机系统来说,由于接收信号是超宽带信号,其脉冲宽度极窄,频谱很宽,若进行高频实时采样,成本很高,但如果用等效采样的方法对其进行采样,便会极大地减小对高频超宽带信号采样的难度,而且成本也会大幅度减小。等效采样这种高速采样手段也越来越成为超宽带雷达接收机发展的趋势。

在等效采样接收机中,每次采样都由某一触发信号来启动,一旦检测到触发信号,接收机就会在一个很短的触发时间内完成采样,而下一次触发时间会改变采样间隔的整数倍,直到采样点遍历整个接收信号周期。而脉冲产生技术能够控制采样门电路每次采样的导通时间。

就当前研究现状来看,脉冲产生技术主要有 3 种不同的产生方法:逻辑门电路脉冲产生方法、阶跃恢复二极管(SRD)脉冲产生方法以及雪崩晶体管脉冲产生方法,而选择合适的方法对完成相应的应用至关重要^[1]。

逻辑门电路脉冲产生方法^[2-3]是基于 CMOS 和 ECL 等快速逻辑器件来产生窄脉冲的,脉冲宽度由逻辑器件的转换传播延时决定,而脉冲边缘由输出端逻辑器件的上升下降时间决定。这种方法产生的脉冲同步性好,脉冲宽度窄,但是受逻辑器件转换速率的制约,而且脉冲幅度太小,仅有几百毫伏。

SRD 脉冲产生方法^[4-6]是基于少数载流子的阶跃特性来产生窄脉冲的。这种方法可以产生脉宽很窄的脉冲,还可用来完成脉冲整形,减小脉冲宽度,但同样幅度偏小。

雪崩晶体管脉冲产生方法^[7-9]是利用雪崩晶体管的雪崩倍增效应来产生窄脉冲。这种方法是产生纳秒脉冲比较传统的方法,它能够产生同步输出脉冲,且脉冲电压也很大,很适合等效采样电路,但是其需要相对高的输入电压,且脉冲宽度略宽,抖动略大,需要后期的整形以减小其脉冲宽度。

现有的方法产生的脉冲要么脉冲幅度高脉冲宽度却很宽,要么产生的脉冲宽度很窄,脉冲幅度却太小,为此,本文给出了一种新颖设计方法,很好地平衡了脉冲幅度和脉冲宽度的关系,恰到好处地吻合了超宽带雷达系统等效采样接收机取样脉冲的指标。本文设计了由雪崩晶体管和肖特基势垒二极管构成的亚纳秒级取样脉冲产生电路,利用安捷伦公

司推出的先进设计系统(ADS)对该电路进行了仿真分析,并在普通的聚四氟乙烯(FR4)基片上实现了该电路,仿真结果与实测结果一致性良好,进一步验证了该设计的合理性。这种取样脉冲产生器设计思路清晰、结构简单、制作工艺简单、便于集成,具有良好的选通性能,波动比较小,因此将其作为超宽带穿墙雷达系统等效采样接收机取样脉冲产生器是十分理想的。

2 设计思路

在超宽带穿墙雷达等效采样接收机中,取样门电路和取样脉冲是关键。由于平衡取样门结构具有良好的对称性,能够消除和减小取样脉冲和取样门引入的噪声,提高信噪比,具有很高的取样效率,因此被应用在穿墙雷达等效采样接收机设计中。取样二极管可选用 HSMS-2828 型肖特基二极管桥,其正向电流为 10 mA 时正向电压小于 0.5 V,故可选取取样脉冲露头部分的幅度为 $\Delta = 1\text{ V}$ 。又因为取样门偏压不能大于取样门二极管反向击穿电压,且取样脉冲的幅度决定取样电路的输入动态范围,幅度越高,输入动态范围越宽,故而选用取样脉冲总幅度为 $\Delta_0 = 6\text{ V}$ 。而对于频带为 6 GHz 的取样门电路来说,根据 $B = 0.45/\tau$ 及取样脉冲总底宽 $\tau_0 = \tau \cdot \Delta_0/\Delta$,近似计算可得 $\tau_0 = 450\text{ ps}$,其中 τ 为取样脉冲的有效宽度,那么取样门电路对取样脉冲的要求即为其脉冲电压幅度要大于 6 V,脉冲底宽要小于 450 ps^[10-11]。

为了产生这样电压高脉宽极窄的脉冲,取样脉冲产生器需要采用多级电路:因为取样脉冲的幅度要求比较高,于是可利用雪崩晶体管产生幅度高的雪崩脉冲;而窄脉冲的触发效果比方波信号的触发效果好,那么可在雪崩电路前添加微分电路;又因为取样脉冲底宽要小于 450 ps,故而需要在雪崩电路后进行整形以减小雪崩脉冲的脉冲宽度,同时很好地保留其高电压的优势。图 1 为取样脉冲产生器的设计思路。

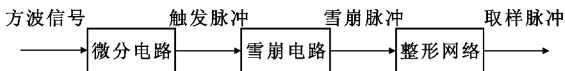


图 1 取样脉冲产生器的设计思路
Fig. 1 Design illustration of sampling pulse generator

由图 1 可知,输入的方波信号经过微分电路后得到边缘整形的双极性触发脉冲,接着正极性的触发脉冲触发雪崩晶体管产生雪崩倍增效应以获得雪崩式的大电压窄脉冲,然后整形网络对该脉冲进行整形,从而得到亚纳秒级的取样脉冲。另外,输出端的耦合电容和负载构成了天然的 RC 高通滤波电路,有助于提高取样脉冲的质量。

根据取样脉冲产生器的设计思路,即可设计出取样脉冲产生电路如图 2 所示,它由四部分构成:微分电路、雪崩电路、整形网络以及 RC 网络。

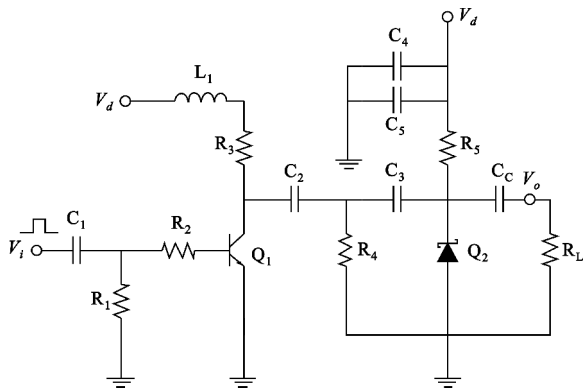


图 2 取样脉冲产生器电路
Fig. 2 Circuit of sampling pulse generator

微分电路由电阻 R_1 和电容 C_1 组成,它能提取输入方波信号的脉冲边缘,降低占空比,更好地触发雪崩晶体管产生雪崩倍增效应。输入方波信号 V_i 的脉冲重复频率 PRF 必须与发射信号同步,且不小于 1 MHz 。微分电路的时间常数要远小于方波信号正脉冲宽度,即 $\tau_1 < t_d$,其中 t_d 为输入方波信号正脉冲宽度, $\tau_1 = R_1 C_1$,可取 R_1 为 $27\text{ }\Omega$, C_1 为 10 pF 。电阻 R_2 为调理电阻,防止晶体管过压,其阻值不能太大,否则会降低输出脉冲幅度, R_2 可取 $10\text{ }\Omega$ 。

雪崩电路由直流电源 V_c 、电感 L_1 、电容 C_2 、电阻 R_3 、 R_4 和雪崩晶体管 Q_1 组成,它能产生高斯窄脉冲。直流电源 V_c 为雪崩晶体管提供偏置电压,使雪崩管处于临界雪崩状态;而电感 L_1 为电源滤波,偏置电阻 R_3 确保 Q_1 能够处于雪崩状态;电容 C_2 和电阻 R_4 构成积分输出,获得雪崩状态后的窄脉冲。雪崩晶体管导通前,偏置电源主要对充电电容 C_2 充电,其充电时间常数约为 $\tau_2 = (R_3 + R_4) C_2$,且充电时间常数要小于脉冲重复间隔 $PRT = 1/PRF$,即 $\tau_2 \leq 1/PRF$,而 R_3 不能太小,否则分压小,雪崩晶体管功

耗大,容易损耗;若 R_3 太大,脉冲上升下降时间变长,可取 R_3 、 R_4 为 $1\text{ }000\text{ }\Omega$, C_2 为 51 pF 。

整形网络由耦合电容 C_3 、电阻 R_5 、阈值电压 V_d 以及肖特基二极管 Q_2 组成,它能减小雪崩脉冲的宽度,以及减小雪崩脉冲的哑铃和波动现象。因为肖特基二极管的反向恢复时间,即二极管由流过正向电流的导通状态切换到不导通状态所需的时间才几十皮秒,因此可将其作为快速开关,选择性地让高于一定门限的信号通过,而这个门限由阈值电压 V_d 决定,而阈值电压应确保信号刚好能够顺利通过。 R_5 为旁路电阻,取 $1\text{ }000\text{ }\Omega$,而耦合电容 C_3 太小容易导致信号幅度严重衰减,太大会导致电路延时明显,应该取信号无衰减通过的最小电容值,这里取 $1\text{ }000\text{ pF}$,电容 C_4 和 C_5 是可滤除电源噪声,分别取 $100\text{ }\mu\text{F}$ 和 $0.1\text{ }\mu\text{F}$ 。

RC 网络由耦合电容 C_c 、负载电阻 R_L 组成,以滤除低频输出脉冲噪声。正如文献[12]所述,若从时间维看,如果要得到小于 400 ps ,则时间常数 $\tau = R_L C_c$ 要小于 0.1 ns ;而从幅度维看,负 RC 网络传输函数为

$$H(j\omega) = \frac{R_L}{R_L + 1/j\omega C_c} = \frac{1}{1 + 1/j\omega R_L C_c}$$

有

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (1/\omega R_L C_c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}}$$

其中, $f_L = 1/2\pi R_L C_c$,且 $f_L < 6\text{ GHz}$,则 R_L 和 C_c 的乘积越大,增益越大。很明显,幅度和脉宽是一对矛盾的因素,在设计过程中需要同时去考虑,如 R_L 通常设为 $51\text{ }\Omega$,则可取 C_c 为 1 pF 。

3 仿真结果

根据对取样脉冲产生电路的分析可知,电路共分为四部分,其中,在雪崩电路中,雪崩晶体管选用 Infineon Technologies 公司的 NPN 型晶体管 BFP420,它是一种高增益低噪声的晶体管,其特征频率为 $f_T = 25\text{ GHz}$,集电极-发射极雪崩击穿电压 $V_{CEO} = 4.5\text{ V}$,集电极-基极雪崩击穿电压 $V_{CBO} = 15\text{ V}$,且经过镀金后稳定性很高。整形网络中,肖特基二极管选择 Philips Semiconductors 公司的 BAT83 型肖特基势垒二极管,它是一种超高速开关,其正向电压低而击穿电压高的特点十分有利于对雪崩脉冲整形。图

3 为取样脉冲发生器的输出窄脉冲信号 V_o 。

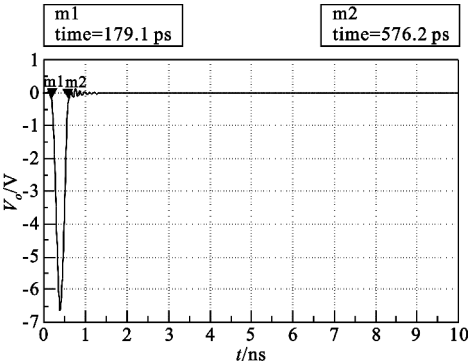


图 3 取样脉冲发生电路输出脉冲

Fig. 3 Output pulse of sampling pulse generator

由图 3 可知,取样脉冲产生器的输出脉冲底宽为400 ps,脉冲幅度为6.7 V,哑铃水平达到-36 dB,仿真结果充分证明了该电路设计的合理性和应用性,能够很好地满足超宽带穿墙雷达系统等效采样接收机对取样脉冲的要求。同时,输出取样脉冲仍然存在小幅度哑铃现象,这主要是由肖特基二极管开断状态的转变能力有限造成的。

为了说明本文提出的整形网络突出的优点,这里给出基本雪崩电路产生的雪崩脉冲、雪崩脉冲经过新型整形网络产生的窄脉冲和经过 Sim S 等人提出的 RC 整形网络^[3]所产生的窄脉冲对比,如图 4 所示。

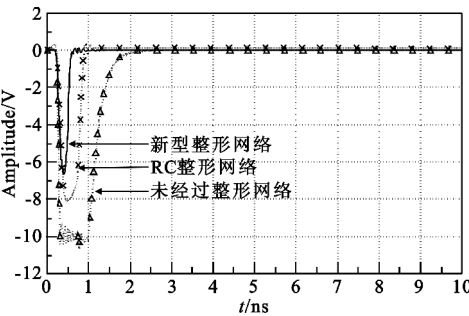


图 4 雪崩脉冲整形后对比

Fig. 4 Contrast of shaped avalanche pulse

由图 4 可知,基本雪崩电路产生的雪崩脉冲幅度达到 10 V,脉冲底宽接近 1.8 ns,波形振荡比较明显;雪崩脉冲经过 RC 整形网络整形之后,脉冲宽度和波动现象有了明显的减小。而经过新型整形网络整形之后,脉冲宽度有了更加明显的减小,同时保持了较高的脉冲幅度,即该脉冲的幅度和脉宽能够同

时满足超宽带雷达系统对取样脉冲的要求,进一步证明了该脉冲产生电路设计的合理性。

4 实验测试

该取样脉冲发生器制作在介电常数为 9.6、厚度为1.6 mm 的 FR4 的板材上,板材大小为6 cm × 4 cm,实物如图 5 所示。

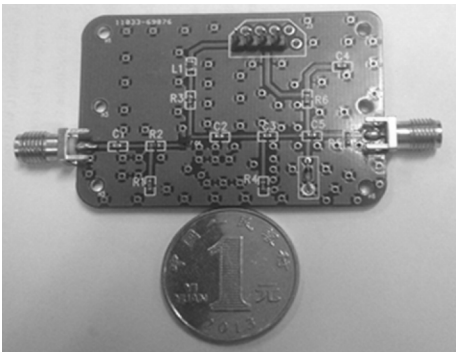


图 5 取样脉冲发生器实物

Fig. 5 Photo of sampling pulse generator

射频电路设计上不仅要考虑普通设计的布局,还要考虑如何减小射频电路中各部分间的相互干扰。由图 5 可知,电路板分为上下两层,顶层主要是信号走线,底层主要分布模拟地,同时尽可能地避免信号线破坏接地部分的连续性,否则会因为电流强制绕行而产生不必要的自感效应,从而导致信号严重的拖尾现象和电路串扰。正是这些高频信号线可能的信号串扰,布线时要尽量减小信号线平行的长度,让高频小信号和微弱信号尽量避开电源等强干扰源,缩短高频元器件间的连线,甚至还要对部分线路周围钻孔。

在电路板测试中,输入电压源主要由 MOTECH 公司的 LPS-305 型可编程电源提供,输入方波信号由 Tektronix 公司的 Arbitrary Waveform Generator AWG 7122C 型波形发生器提供,其频率为1 MHz,占空比为 50%。测试仪器需要的采样间隔最大为 40 ps,即采样点频率至少为25 Gsample/s,因此测试仪器可选 Tektronix 公司的 Digital Phosphor Oscilloscope DPO 71254 型示波器,该示波器的采样点频率达到50 Gsample/s,能够很好地测试出取样脉冲波形,但是示波器对所测波形的电压幅度有限制,实际测试中需要在输出端添加10 dB 的电压衰减。图 6

为取样脉冲产生器的实际测试波形。

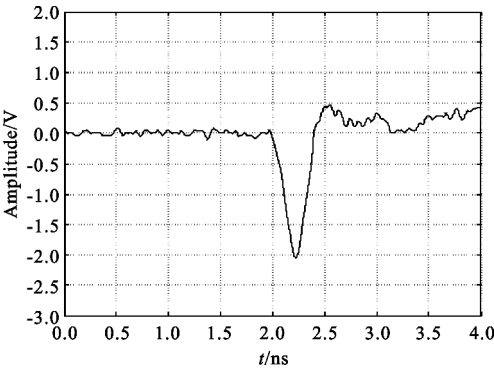


图6 取样脉冲发生器测试波形(10 dB衰减)
Fig. 6 Measured waveform of sampling pulse generator(with 10 dB attenuation)

从图6可知,取样脉冲产生器的输出脉冲脉宽为400 ps,脉冲幅度为2.04 V。根据衰减分贝数 $-20\lg(U_1/U_2)$ dB,其中 U_1 和 U_2 分别为衰减前后的电压幅度,则实际的脉冲幅度为6.46 V,与理论仿真结果基本吻合,也符合等效采样接收机对取样脉冲的要求。同时,实际产生的窄脉冲仍然存在波动现象,波动幅度最大达到了-14.7 dB,这不仅与肖特基二极管有限的开断状态转换能力有关,而且与模拟电路的高频串扰有关。表1给出了该取样脉冲产生电路与相关文献的对比,以验证其作为取样脉冲的优越性。

表1 窄脉冲产生器性能比较

Table 1 Performance comparison of narrow pulse generators					
窄脉冲产生器	能量损耗/mW	供电电源/V	脉冲宽度/ps	脉冲幅度/V	技术
文献[2]	5.65	1.2	142	0.50	CMOS
文献[5]	-	2.0	300	0.18	SRD
文献[6]	-	>7.0	400	0.20	SRD
文献[8]	>320.00	20.0	1 140	13.20	BJT
文献[9]	>320.00	20.0	816	13.10	BJT
本文	>160.00	15.0	400	6.46	BJT

从表1可以看出,在各种超宽带脉冲产生技术中,CMOS等逻辑器件和SRD产生的窄脉冲具有功耗低、供电需求低、脉冲宽度窄的优点,但脉冲幅度很小;而雪崩晶体管能够产生较大幅度的窄脉冲,但供电要求高,能耗也高。由于超宽带系统的特殊性,

不同的电路设计和结构差异很大,实际应用中需要根据具体的应用做最合适的设计。本文正是基于超宽带穿墙雷达取样脉冲的需求设计了新型整形网络,结合了雪崩晶体管的优点,极大地减小了雪崩脉冲的脉冲宽度,并保持了较高的脉冲电压,减小了功耗和供电电压。

5 结 论

本文基于超宽带穿墙雷达等效采样接收机的技术要求,采用雪崩晶体管和肖特基势垒二极管设计并实现了一种亚纳秒级取样脉冲产生电路。文中提出了由肖特基二极管构成的新型整形网络,很好地结合了雪崩电路产生高电压脉冲的优点,产生了脉冲底宽为400 ps、电压幅度为6.46 V、啞铃水平低于-14.7 dB的窄脉冲,理论仿真结果和实际测试结果一致性良好,很好地证明该设计的合理性和实用性。与现有的方法相比,该方法很好地平衡了脉冲幅度和脉冲宽度的关系,恰到好处地吻合了超宽带雷达系统等效采样接收机取样脉冲的指标。此外,该方法设计简单,易于实现和集成,还可用作冲激雷达的发射信号。下一步的研究重点将是解决窄脉冲啞铃和波动现象,进一步在保持高电压的前提下尽可能地减小脉冲宽度,为更精确更快速地完成高频信号采样打下良好基础。这些技术还可以用于产生极窄高电压的发射信号,从而减弱超宽带信号在穿墙过程中衰减快的影响,甚而完成脉冲产生技术由分立元件模式向集成电路的完美转变。

参考文献:

[1] Alessio D A, Marco D, Riccardo G, et al. Experimental Comparison of Low-Cost Sub-Nanosecond Pulse Generators [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 310-318.

[2] Arafat M A, Harun-Ur-Rashid A B M. A novel 7 Gbps low-power CMOS ultra-wideband pulse generator [J]. IET Circuits Devices System, 2012, 6(6): 406-412.

[3] Sim S, Kim D, Hong S. A CMOS UWB Pulse Generator for 6-10 GHz Applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(2): 83-85.

[4] Ye S, Chen J, Liu L, et al. A Novel Compact UWB Ground Penetrating Radar System [C]//Proceedings of 2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar. Shanghai: IEEE, 2012: 71-75.

- [5] 程方,唐宗熙. 一种用于 UWB 系统的高斯脉冲发生器 [J]. 电讯技术,2007,47(4):159-161.
CHENG Fang,TANG Zong-xi. A Gaussian Pulse Generator for UWB Applications [J]. Telecommunication Engineering,2007,47(4):159-161. (in Chinese)
- [6] Han J, Huynh C, Nguyen C. Tunable Monocycle Pulse Generator Using Switch Controlled delay Line and Tunable RC Network for UWB Systems [C]//Proceedings of 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Toronto, ON:IEEE,2010:1-4.
- [7] Zou A, Wang H, Wang Y. Nanosecond Pulser Based on Serial Connection of Avalanche Transistors [C] //Proceedings of 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha: IEEE,2010:752-755.
- [8] Tang P, Luo S, Li C, et al. An UWB GPR transient source based on avalanche transistor [C] //Proceedings of 5th Global Symposium on Millimeter Waves. Harbin: IEEE, 2012:326-329.
- [9] 林基明,樊孝明,郑继禹. 基于 RF-BJT 的超宽带极窄脉冲发生器的设计[J]. 电讯技术,2005,45(5):61-64.
LIN Ji-ming,FAN Xiao-ming,ZHENG Ji-yu. Design of a UWB Pulser Based on RF-BJT [J]. Telecommunication Engineering,2005,45(5):61-64. (in Chinese)
- [10] 黄蕾. 探地雷达回波信号数据采集方法的研究与实现[D]. 武汉:武汉大学,2003.
HUANG Lei. The research and implementation of the

GPR echo signal data acquisition method [D]. Wuhan: Wuhan University,2003. (in Chinese)

- [11] Chen Y, Yin X, Tang D, et al. Design and simulation of 100ps transient sampling gate based on high speed Schottky diode [J]. High Power Laser and Particle Beams,2006,18(1):45-50.
- [12] Wang Q, Tian X, Liu Y, et al. Design of an Ultra-wide-band Pulse Generator Based on Avalanche Transistor [C] //Proceedings of 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian:IEEE,2008:1-4.

作者简介:



郭宇(1989—),男,湖北洪湖人,硕士研究生,主要研究方向为超宽带雷达收发系统;

GUO Yu was born in Honghu, Hubei Province, in 1989. He is now a graduate student. His research concerns UWB radar receiver.

Email:guoyu0834@126.com

朱国富(1972—),男,河南开封人,副教授、硕士生导师,主要研究方向为非战争军事行动中的传感器与信息处理技术。

ZHU Guo-fu was born in Kaifeng, Henan Province, in 1972. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns sensor and signal processing in non-military action.