

超宽带时域天线阵列延时控制扫描实验*

袁雪林^{1,4}, 张洪德², 徐哲峰³, 张光甫⁴, 袁乃昌⁴

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 重庆通信学院 三系, 重庆 400035;

3. 国防科学技术大学 图书馆, 长沙 410073; 4. 国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 超宽带(UWB)冲激雷达目标探测中时域天线阵列波束延时控制扫描是通过天线阵列单元间精确的延时控制实现的。在介绍 UWB 时域波束延时控制扫描原理的基础上,研制了用于 UWB 天线时域波束扫描的延时控制器,其延时步进为 50 ps,延时精度可达 10 ps。利用该延时控制器对单元间距 42 cm 的 4 单元 UWB 天线阵列 H 面方向进行了单元间延时控制波束扫描测量,扫描步进角度小于 2°。结果显示,在 0°,10°,20°和 30°扫描时,实际扫描角度分别为 -0.5°,10.5°,20°和 29.5°,与理论计算值之间误差小于 1°。

关键词: 延时控制器; 超宽带冲激雷达; 时域天线; 波束扫描

中图分类号: TN782 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102202.0289

近年来,超宽带(UWB)时域天线在宽带通信、扩频通信、探地雷达、冲激雷达、电磁兼容等瞬态电磁场领域获得了大量的应用^[1-3]。UWB 冲激雷达通过发射和接收无载波短脉冲信号,从回波信号中获取目标距离、速度和精细结构等信息。作为一种全新体制的超宽带雷达,在其目标探测(特别是中远程)中实现 UWB 时域天线波束扫描对推动其实用化有着重要意义。

目前以频域为基础的天线和天线阵列规律的研究已十分成熟,以时域为基础的天线和天线阵的研究随着超宽带技术的发展日益受到重视^[4-8]。文献[5]对天线阵列辐射窄带信号和超宽带短脉冲信号的特性进行了比较,得到较为理想的时域天线方向图。文献[6]设计一个辐射超宽带短脉冲信号的 UWB 时域天线阵列,理论计算和实际测量的 1~12 GHz 的方向图一致,但其对方向图的表述仍然采用的是频域方式,即给出若干典型频率点的方向图。本文研制了用于 UWB 天线时域波束延时扫描的延时控制器,并利用该控制器对 4 单元 UWB 天线阵列 H 面方向进行了时域波束延时控制扫描测量。

1 UWB 时域波束延时控制扫描

UWB 雷达时域波束扫描的概念从窄带雷达相控阵技术借鉴而来,其特点在于依靠单元间的精确延时控制而不是移相器实现阵列波束扫描,系统结构简化,造价相对低廉。冲激脉冲持续时间仅为 ns 或亚 ns 量级,实现各个阵元之间的精确延时控制对脉冲源单元的时基控制精度有很高的要求。而高稳定度、全固态、多路相干合成纳秒脉冲源^[3, 9-10]及精确的延时控制技术的突破,为 UWB 天线阵时域波束延时控制扫描奠定了坚实的技术基础。

以 N 元线阵为例,如图 1 所示,假设各个脉冲辐射天线单元同时全向性辐射,则对于远场区域,法线方向上各单元波程相等,波程差为 0,成为方向图阵因子的增益最大方向;而对于与法线成 θ 夹角方向,第 n 个单元与第 N 个单元之间的波程差为

$$\Delta R_n = (N - n)dsin\theta \quad (1)$$

显然,对于远处 (R, θ) 点,各辐射单元脉冲到达时间差为 $\Delta R_n/c$, (c 为自由空间光速),空间合成电磁场强度小于法线方向 $(R, 0)$ 点。可见,若将各辐射单元的脉冲发射时基依次延时为 $-\Delta R_n/c$,各辐射单元脉冲就可同时到达 (R, θ) 点,即可使得与法线夹角 θ 向成为线阵方向图主瓣方向,完成阵方向图由原来的法线方向

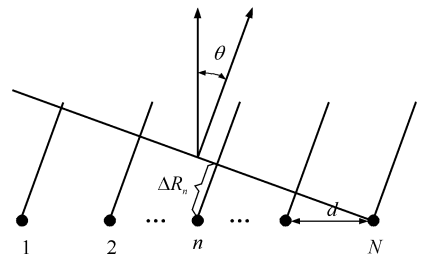


Fig. 1 UWB antenna line-array of N units
图 1 UWB 天线 N 元线阵

到 θ 角度的扫描,这就是超宽带时域波束扫描的基本思想。若单元天线方向图是全向性的,超宽带 N 元线阵

* 收稿日期:2009-02-08; 修订日期:2009-10-19

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:袁雪林(1979-),男,博士,主要从事高功率微波、全固态脉冲源技术、超宽带信号处理等研究;yucca1979@tom.com。

线阵方向图波束需要扫描至与法线成 θ 夹角方向时,各个辐射单元的脉冲辐射时基延时差应依次为

$$\Delta t_n = -(N - n) d \sin \theta / c \quad (2)$$

UWB 天线的时域扫描总体框图如图 2 所示,主控计算机根据扫描角度延时需要向延时控制电路发送相应指令,延时控制电路根据指令对脉冲源提供触发信号,实现时域天线扫描^[8]。

2 高精度延时控制器设计

通过分析可知,实现 UWB 天线阵列时域

扫描的关键在于精确控制各个阵元间的时间延迟量,这由精确的延时控制器完成。延时控制器的结构如图 3 所示,它由 RS232 接口芯片 MAX232、单片机、FPGA、输入缓冲器、时钟、程序 ROM、细调延时器 1~8、粗调延时器 1~8 和输出驱动 1~8 构成。单片机通过 RS232 接口芯片 MAX232 与计算机进行通信,并将计算机的控制指令传送给 FPGA,FPGA 根据延时控制器功能和控制指令计算各通道需要的延时量。FPGA 采用 Xilinx 公司 Spartan2 系列的 XC2S200-PQ208,40 万门,支持丰富的接口标准,外时钟可达 200 MHz 以上。

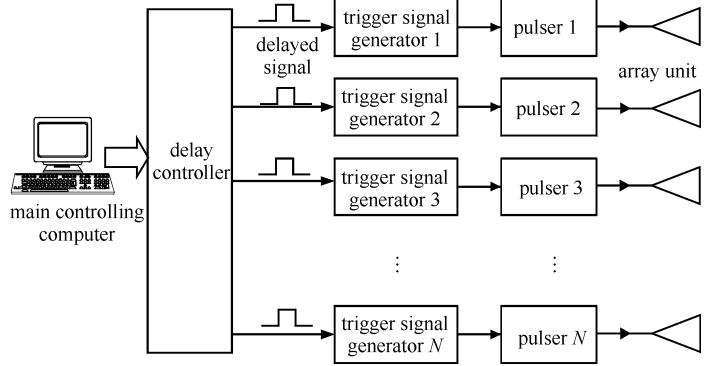


Fig. 2 Schematic diagram of UWB antenna array time-domain scan

图 2 UWB 天线时域扫描框图

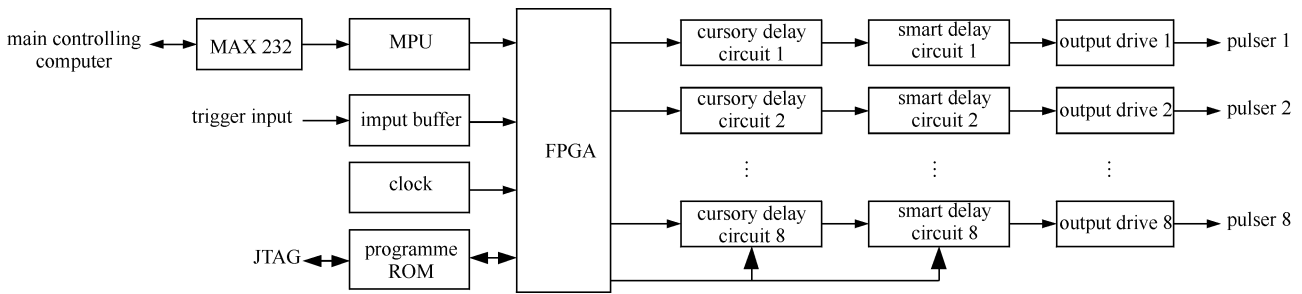


Fig. 3 Structure of delay-controller

图 3 延时控制器结构框图及照片

粗调延时由数字延时控制器完成,由延时计数器和脉宽计数器组成。FPGA 提供触发脉冲上升沿触发延时计数器开始计数,直到计数器值等于延时量,此时计数器清零并输出一窄脉冲(延时触发信号);延时触发信号触发脉宽计数器开始计数并且计数器输出由低电平变为高电平,直到计数器值等于脉宽量,计数器清零并且输出由高电平变为低电平,这样就得到了一个延时和脉宽均可控的延时输出信号。数字延时的延时步进等于计数器时钟周期,延时范围取决于计数器的阶数,为了得到高精度和大范围的延时控制,一般需要多级计数器串联工作。本文中的数字延时器由 2 级计数器串联组成,延时步进 500 ps。

细调延时器是对粗调延时器的补充,采用模拟延时器,由触发电路、斜坡信号产生器、数模转换器(DAC)和比较器组成。其中,触发信号的上升沿触发斜坡信号发生器开始工作,产生一定斜率为负的斜坡信号;DAC 在外部输入数据的控制下产生固定电平;当斜坡发生器的输出电压低于 DAC 的输出时,电压比较器输出发生翻转,由低电平变为高电平;当复位有效时(高电平),比较器的输出复位为低电平,这样就得到了延时的输出信号。输出信号前沿相对于触发信号前沿的延迟取决于斜坡信号的斜率和 DAC 的输出电平,在斜坡信号斜率一定的情况下,改变 DAC 的输入数据,即可控制延时量的大小,而通过改变斜坡信号的斜率可以控制整个系统的延时分辨率和总的延时范围(DAC 位数确定);输出信号的脉冲宽度则取决于复位信号的延迟时间。

粗调延时器在延时量大于 500 ps 时发生作用,细调延时器决定延时精度。选择 Analog Device 公司的 AD9501 数字可编程延时器可以满足要求。延时控制器主要技术参数为:8 路输出通道数,延时步进为 50 ps,延时范围为 0~300 ns,延时精度为 10 ps,输出电平为宽度 3 μ s 的 TTL、CMOS 兼容电平。根据式(2),对于单元间距为 42 cm 的天线阵扫描精度可达 1°。延时控制器实物如图 4(a)所示。

3 实验测试

3.1 实验装置

UWB 时域天线波束延时控制扫描实验装置连接如图 2 所示,由主控计算机、延时控制器(图 4(a))、全固态脉冲源(图 4(b))、待测 UWB 天线阵列(图 4(c))、接收 UWB 天线(图 4(d))、高速采样示波器等设备构成。

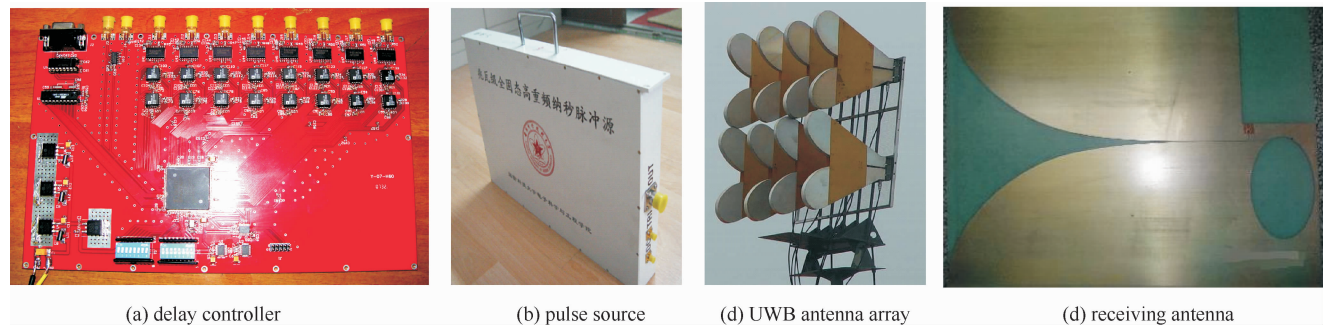


Fig. 4 Experiment equipments of delay-controlled beam scan

图 4 波束延时控制扫描实验装置

主控计算机根据扫描角度的需要计算出各脉冲源单元触发脉冲时基的延时量,通过串口向延时控制器发送相应的延时指令,延时控制器向脉冲源提供适当延时的触发脉冲,待测 UWB 天线阵列连接脉冲源,实现冲激脉冲信号辐射。脉冲源是由项目组研制的全固态脉冲源,输出脉冲为正冲激脉冲信号,脉冲峰值电压 1600 V(50 Ω 负载),脉冲宽度 2 ns,脉冲稳定度高,重复频率可达 40 kHz。待测天线为将 4 \times 2 天线阵 E 面方向的 2 个单元连接一起提高辐射能力而构成的 4 单元 H 面线阵,单元间距为 42 cm,单元天线 H 面方向图如图 5 所示。

接收天线距离发射天线阵 15 m,为集成超宽带开槽天线^[7],其 H 面方向图宽度为 120 $^\circ$ 。高速采样示波器选用 Tektronix 公司的 TDS7404(采样带宽 5 GHz,采样率 20 GHz),对接收天线接收到信号进行采样存储。转动待测的辐射天线一周实时记录所接收信号的峰值电压,即可描绘出其峰值方向图^[5-6],得到其最大辐射方向。测量时每 2 $^\circ$ 为一个测量点,在接近最大辐射方向时每 0.5 $^\circ$ 为一个测量点。承载待测辐射天线的转台由步进电机驱动,转动精度为 0.1 $^\circ$ 。

3.2 实验结果

在 UWB 时域波束延时控制扫描中实现对空间角度 0 $^\circ$,10 $^\circ$,20 $^\circ$ 和 30 $^\circ$ 扫描,由式(2)计算得到不同扫描角度的单元间延时量,由于延时控制器的步进延时是 50 ps,实际延时量取最接近的值,如表 1 所示。

表 1 扫描实验中单元间延时量

Table 1 Delay time between units in array scan experiment

prospective scan angle/($^\circ$)	computed delay time/ps	practical delay time/ps	computed scan angle/($^\circ$)
0	0	0	0
10	243	250	10.3
20	479	500	20.9
30	700	700	30.0

不同扫描角度峰值方向图如图 6 所示。0 $^\circ$,10 $^\circ$,20 $^\circ$ 和 30 $^\circ$ 扫描时分别得到-0.5 $^\circ$,10.5 $^\circ$,20 $^\circ$ 和 29.5 $^\circ$ 的实际扫描角度,与理论计算值之间误差均在 1 $^\circ$ 以内,天线阵列波束实际扫描角度与理论计算基本一致;方向图主瓣较单元方向图变窄,方向性增强。随着天线扫描角度的增大,其主瓣波束宽度展宽,到一定角度时将产生较大的旁瓣。这是由单元天线的方向性引起的,也即如果天线单元的方向图是全向的,通过单元间的脉冲触发延时能够实现 UWB 时域天线阵列的全方位波束扫描。

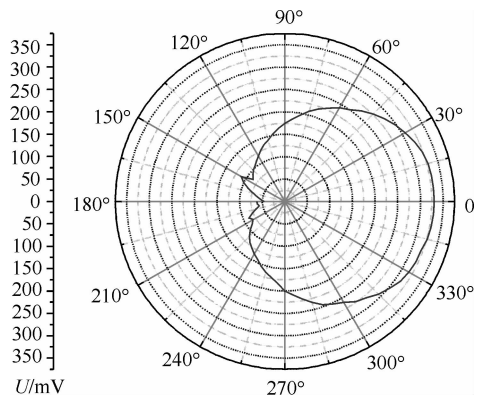


Fig. 5 H-side peak-voltage pattern of element antenna

图 5 H 面单元峰值方向图

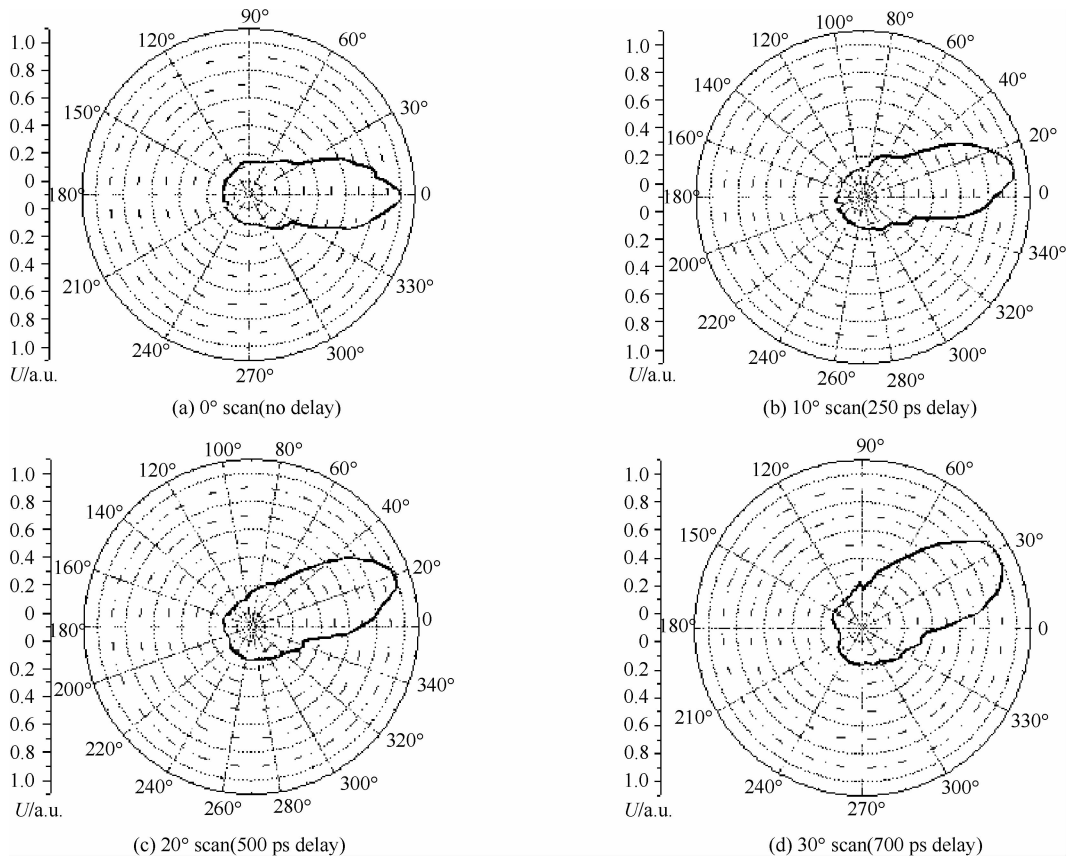


Fig. 6 Angle scan of different delay time

图 6 不同延时的角度扫描

4 结 论

相对于相控阵天线通过移相器调节单元间的相位实现空间波束扫描, UWB 时域天线阵列可以通过天线单元间的触发脉冲的精确延时控制来实现时域波束扫描, 扫描角度的误差和步进取决于延时控制的精度和步进。本文研制了适用于 UWB 时域天线波束扫描的高精度延时控制器, 实现了高精度的延时控制扫描初步实验, 扫描角度误差在 1° 内, 扫描步进角度小于 2° 。

在以后的工作中, 可以通过改善单元天线方向图的全向性, 增大阵列的扫描角度范围。另外, 如何实现更多阵元的 UWB 时域天线阵列空间扫描、H 面和 E 面全空间扫描以及如何通过阵元间的精确延时实现 UWB 时域天线阵列的针状波束扫描、多波束扫描还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Barrett T W. History of ultrawideband (UWB) radar & communications; Pioneers and innovators[C]. Progress in Electromagnetics Symposium. 2000.
- [2] Barrett T W. History of ultra wideband communications and radar; Part I, UWB communications[J]. *Microwave Journal*, 2001, (1): 22-54.
- [3] 袁雪林, 梁步阁, 吕波, 等. 探地雷达高功率高稳定度脉冲源设计[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(10): 1689-1692. (Yuan Xuelin, Liang Buge, Lü Bo, et al. Design of high-power and high-stability pulser for GPR. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(10): 1689-1692)
- [4] Smith G S. A note on the criteria for the far zone in the time-domain analysis of antennas[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 2006, **54**(1): 292-297.
- [5] Domenico L D. A comparison of time versus frequency domain antenna patterns[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 2002, **50**(11): 1560-1566.
- [6] Licul S, Davis W A. Unified frequency and time-domain antenna modeling and characterization[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 2005, **53**(9): 2882-2888.
- [7] 袁乃昌, 何建国, 尹家贤, 等. 新型集成超宽带开槽天线的研制及其应用[J]. *电子学报*, 1997, **25**(9): 43-46. (Yuan Naichang, He Jianguo, Yin Jiaxian, et al. A new plane integrated slot antenna and its applications. *Acta Electronica Sinica*, 1997, **25**(9): 43-46)
- [8] Yuan Xuelin, Zhang Guangfu, Huang Jinjian, et al. Study of UWB time-domain antenna scan[C]//Proc of 6th Int Conf on Microwave and

Millimeter Wave Technology, 2008, 1134-1136.

- [9] 袁雪林, 徐哲锋, 张洪德, 等. UWB 冲激雷达全固态高重复频率脉冲源设计[J]. 微波学报, 2008, **24**(5): 35-39. (Yuan Xuelin, Xu Zhefeng, Zhang Hongde, et al. Design of the full-solid high-repetition pulser in UWB impulse radar. *Journal of Microwaves*, 2008, **24**(5): 35-39)
- [10] 梁步阁, 张光甫, 张伟军, 等. 全固态高稳定度纳秒脉冲源的相干合成技术[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(6): 1041-1045. (Liang Buge, Zhang Gangfu, Zhang Weijun, et al. Synchronization of full-solid high-stability nanosecond pulse sources. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(6): 1041-1045)

Experiment of UWB time-domain antenna beam scan by controlling delay

Yuan Xuelin^{1,4}, Zhang Hongde², Xu Zhefeng³, Zhang Guangfu⁴, Yuan Naichang⁴

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. No. 3 Department, Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China;

3. Library, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

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

Abstract: The theory on beam scan of ultrawide-band (UWB) time-domain antenna is introduced, and it is pointed out that accurate delay between antenna units is the key problem. Therefore, an accurate delay-controller, used in beam scan of UWB time-domain antenna array, has been designed with 50 ps delay step and 10 ps precision. Experiments on beam scan of a 4-unit UWB antenna array with unit spacing of 42 cm has been conducted with this controller controlling the delay between units. The scan step of angle is less than 2° , and the actual scan angles are -0.5° , 10.5° , 20° and 29.5° respectively for the objective angles of 0° , 10° , 20° and 30° . The error between experimental result and theoretical calculation is under 1° .

Key words: delay-controller; ultrawide-band impulse radar; time-domain antenna; beam scan