

高新科技译丛

雷达技术系列

时域超宽带雷达传感器 组件理论分析与设计

*Time-Domain Ultra-Wideband Radar, Sensor and Components:
Theory, Analysis and Design*

【美】Cam Nguyen

著

【韩】Jeongwoo Han

黄振宇 王彦斌 郝永旺 戴幻尧 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



Springer

时域超宽带雷达传感器 组件理论分析与设计

Time - Domain Ultra - Wideband Radar, Sensor and
Components: Theory, Analysis and Design

[美] 阮凯姆 (Cam Nguyen) 著
[韩] 韩正佑 (Jeongwoo Han)

黄振宇 王彦斌 郝永旺 戴幻尧 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2016-072 号

图书在版编目(CIP)数据

时域超宽带雷达传感器组件理论分析与设计 / (美)
阮凯姆 (Cam Nguyen), (韩) 韩正佑 (Jeongwoo Han)
著; 黄振宇等译. —北京: 国防工业出版社, 2017. 4

书名原文: Time-Domain Ultra-Wideband Radar,
Sensor and Components: Theory, Analysis and Design
ISBN 978-7-118-11233-7

I. ①时… II. ①阮… ②韩… ③黄… III. ①时域-
超宽带雷达-传感器-组件-分析②时域-超宽带雷达-
传感器-组件-设计 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 048539 号

Translation from the English language edition: Time-Domain Ultra-Wideband Radar,
Sensor and Components Theory, Analysis and Design by lam Nguyen Jeongwoo Han. ©
Springer International Publishing Switzerland 2014. All Rights Reserved.
本书简体中文版由 springer 授权国防工业出版社独家出版发行, 版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京京华虎彩印刷有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 4% 字数 120 千字
2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 69.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777
发行传真: (010) 88540755

发行邮购: (010) 88540776
发行业务: (010) 88540717

译者序

近几年来,超宽带(Ultra-Wideband, UWB)技术得到了快速发展。超宽带雷达按照超宽带信号形式的不同可分为两类:有载波的超宽带雷达和无载波超宽带雷达,后者又称冲激脉冲雷达,即本书所指的时域超宽带雷达。

超宽带技术的最初发展要追溯到 20 世纪 50 年代末,当时林肯实验室(Lincoln Laboratory)和斯佩里研究中心(Sperry Research Center)发现了远场和驱动端口的响应近似于等间距的脉冲。1965 年,斯佩里研究中心的 G·Ross 等建立了超宽带技术的理论基础。而超宽带的概念最早见诸于 Harmuth 在 1969—1987 年发表的文章。

20 世纪 70 年代初期,美国罗姆航空研究中心研制出了第一台赫兹冲激脉冲产生器。数年后,洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory)在光导开关方面取得了突破,从而初步解决了冲激超宽带雷达的脉冲产生问题。1970—1980 年, Gerald Ross 与 Dr. Nicolson 结合利用窄带脉冲技术与快速傅里叶变换(FFT)方法开发了测量微波吸收材料隐身特性的固定装置。1974 年, Morey 设计了一个 UWB 探地雷达。1972—1987 年, Rose 和 Robbins 取得了超宽带技术方面的专利。1986 年,第一个短脉冲超宽带通信系统诞生。1960—1999 年,已有 200 多篇超宽带论文在 IEEE 上发表,获得 100 多项专利。

今天,在军事需求和商业市场的推动下,已有越来越多的研究者投入到超宽带雷达领域。

超宽带雷达发射信号的超宽带频谱特性,使其具有很强的穿透性和很高的距离分辨力,随着超快速、高功率砷化镓开关的实现,人们重新开始对非常窄、高能量的脉冲进行研究,超宽带技术对于短距离高数据量传输和超宽带雷达具有很高的应用价值。我国从 20 世纪 90 年代初期开始着手对超宽带雷达进行研究,经过近几十年的发展,在理论和

技术上均取得了重大突破,并在穿墙探测及近地排雷等领域获得了实际应用。

冲激超宽带雷达的一个突出问题就是,当有很多好的方法来获得超宽带信号时,是什么妨碍了冲激脉冲的生成?其原因就是,冲激脉冲在既散射又吸收的物体上产生的效果远远比一般的平稳波形大。这就是窄脉冲带来的现象,而宽脉冲是无法做到的。与正弦波雷达系统不同,它直接发射幅度有限、持续时间极短的周期性脉冲信号,不再借助正弦载波。

关于超宽带雷达技术的研究文章可谓汗牛充栋,但鲜有书籍能够对其组件的理论、分析和设计进行系统而全面介绍,而本书是此领域难得的专著。它涵盖了超宽带系统设计的主要问题,包括系统分析、发射机设计、接收机设计、天线设计以及系统的集成与测试,还给出了一些具体应用的超宽带系统及其发射机、接收机、天线、信号处理、集成和测试组件的设计。

全书由黄振宇、王彦斌、郝永旺、戴幻尧等人共同翻译,对于缩略语、专业术语、人名和组织机构名称等进行了统一。翻译过程中,得到电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室领导的大力支持和多位同志的热心帮助,得到国防工业出版社编辑部同志的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

由于时间以及译者经验和水平所限,尽管我们尽了最大努力,但书中难免还有不尽如人意的地方,敬请读者不吝指正。

译者

2017年1月

前 言

冲激脉冲超宽带(UWB)系统,简称UWB系统,UWB系统不同于连续波体制雷达系统在不同时刻采用不同的正弦连续波(CW)作为载波,冲激雷达的信号发射和接收总是采用同样的脉冲波形,是一类具有独特优越性能的雷达系统。它的工作相当于同时发射和接收多个带宽极宽的正弦连续波信号。换言之,UWB系统可等效为多个不同频率的连续波系统,每个系统工作在超宽的带宽范围内的某一频率上。这种独特的工作方式,使得冲激雷达不仅在设计与性能方面与CW系统显著不同,而且具有CW系统不可能实现的一些应用。人们逐渐发现,UWB系统在军事、安全、民用、商业和医学方面具有广阔的应用前景。UWB系统可适用于在高分辨力成像和远距离探测,尤其在高分辨力成像方面具有诱人的前景。

本书致力于阐述UWB系统及其组件的理论、分析和设计,特别是涵盖了UWB系统设计的主要问题,包括系统分析、发射机设计、接收机设计、天线设计以及系统的集成与测试,还给出了一些具体应用的UWB系统及其发射机、接收机、天线、信号处理、集成和测试组件的设计。以一种非常有效的方式不仅阐述了UWB系统整体的分析、设计和应用,而且描述了其组件的分析和设计。虽然本书非常简短,但是材料齐全,包含足够多实用而又有价值的信息,非常适用于电气工程或者物理方面的应届毕业大学生读者,以及在微波电路方面有经验和学过研究生课程的读者,便于读者理解和设计各种实用的UWB组件、发射机、接收机甚至系统。

本书对于从事雷达、探测器和通信系统方面,以及与微波电路和系统相关专业研究的工程师、物理学家和研究生都是非常有用的。真诚地希望本书不仅仅作为UWB系统及其组件发展的一本参考书,还能够激发出一些创新性的思想,更加有益于目前以及将来探测感知和通信领域的发展。

目 录

第1章 引言	1
1.1 高分辨力和远距离传输	2
1.2 较高的多通道分辨力和抗干扰性能	2
1.3 较低的截获概率或发现概率	3
1.4 降低信号衰落	3
1.5 更好的定位和跟踪精度	3
1.6 简单、低耗的系统结构	3
参考文献	5
第2章 系统分析	7
2.1 简介	7
2.2 UWB 系统的工作方式	7
2.3 UWB 信号	8
2.3.1 高斯脉冲	9
2.3.2 高斯单周期脉冲	10
2.3.3 高斯双周期脉冲	12
2.4 功率分配分析	14
2.5 距离分辨力分析	21
2.6 结论	23
参考文献	23
第3章 UWB 发射机的设计	25
3.1 引言	25

3.2	延时线线 SRD 冲激脉冲发生器的设计	28
3.3	可调谐单周期脉冲产生器的设计	33
3.4	制作与测量	37
3.5	带有转换晶体管的可调谐脉冲和单周期脉冲产生器	42
3.6	结论	44
	参考文献	45
第 4 章	UWB 接收机的设计	48
4.1	引言	48
4.2	选通脉冲产生器的设计	52
4.3	耦合线槽混合采样器	55
4.3.1	耦合线槽混合采样器的设计	55
4.3.2	CSH 采样器的制作和性能	60
4.4	UWB 接收机	65
4.4.1	UWB 接收机的设计	65
4.4.2	UWB 接收机的制作和性能	67
4.5	UWB LNA	70
4.6	结论	75
	参考文献	75
第 5 章	UWB 天线的设计	79
5.1	引言	79
5.2	UWB 类喇叭天线	81
5.2.1	UWB 类喇叭天线的设计	81
5.2.2	微波传输带类喇叭天线的制作和性能	89
5.3	UWB 平面天线	96
5.3.1	UWB 平面天线的设计	96
5.3.2	UWB 平面天线的制作与性能	101
5.4	结论	105
	参考文献	105

第 6 章	UWB 系统集成与测试	107
6.1	引言	107
6.2	UWB 发射天线和接收天线模块的发射 - 接收测试	109
6.3	信号处理	111
6.4	UWB 系统集成	115
6.5	UWB 系统的测试与评估	117
6.5.1	金属板测试	117
6.5.2	分层结构测试	118
6.5.3	公路测试	125
6.5.4	UXO 测试	126
6.6	结论	127
	参考文献	128
第 7 章	概要与结论	129

第1章 引言

在时域电磁学领域,超宽带(UWB)技术的来源可以追溯到20世纪60年代早期,那时电磁波传输的研究主要是从时域的视角展开,而不是现在更常见的频域。然而,“超宽带”术语的首次运用是在1994年,是美国国防部用来展示冲激脉冲的雷达系统。UWB系统通常是指具有超宽工作带宽的系统。这些系统可能具有不同的组成结构,并且用于不同的应用场合,如冲激脉冲雷达、发射信号带有频率调制的连续波(CW)雷达(频率调制连续波(FMCW),或者步进频率雷达)。具体地,如果雷达的工作频率范围超过500MHz或者相对带宽(雷达工作中心频率与绝对带宽之比)大于20%,就可以归类为UWB系统。冲激体制和与FMCW体制或者步进频率体制雷达(通常也称为非冲激脉冲体制或CW体制)的最显著区别在于发射信号的波形。一个FMCW系统发射和接收都采用CW(正弦)信号,一个信号对应一个频率,跨越一个带宽。一个FMCW系统不能同时发射和接收不同频率的信号。也就是说,一个FMCW系统基本上是在工作在一个单频信号的带宽上。一个步进频率体制雷达系统向目标发射的是CW信号的序列,每个对应一定量间隔的不同频率,并接收从目标反射的信号。回波信号的同相分量和正交分量经过时域逆离散傅里叶变换转换为合成脉冲。步进频率雷达在每一个频点上具有非常窄的瞬时带宽,进而在接收机输出端获得较高的信噪比。另外,它的合成带宽非常宽,分辨力较高。此外,较高的平均发射功率使得它具有极强的穿透性,能够实现长距离传输。尽管步进频率雷达最终的接收信号转化成了时域脉冲信号,但仍是CW体制,不能同时发射和接收不同频率的信号。相反,一个冲激雷达发射和接收的是非正弦的周期脉冲信号,该信号可以包含许多不同的频率分量。也就是说,一个冲激雷达可以同时发射和接收许多具有不同频率的CW信号。正是这个特点使得冲激系统和FMCW系统、步进

频率系统在设计、操作、性能和应用方面显著不同。

这里特别需要指出的是本书特指(时域)冲激体制的 UWB 系统,以后章节提到 UWB 系统也都是时域冲激脉冲体制的 UWB 系统。相比基于 CW 系统,UWB 系统具有如下优势。

1.1 高分辨力和远距离传输

由于冲激信号具有超宽带的自然属性,所以 UWB 系统相比 CW 系统具有更宽的瞬时带宽。这些信号既包括低频成分,又包括高频成分,使得冲激雷达更加适合应用于改善距离分辨力和远距离探测。超宽的带宽直接引起极高的距离分辨力,这是因为距离分辨力与带宽成反比。从低频跨越到高频具有超宽频率范围,保证了远距离的探测,是由于其低频成分衰减较小从而能够实现较远的作用距离。需要指出的是,要想使连续波系统在同样的带宽范围和频率上获得同样的分辨力和作用距离也是可以实现的。但是,要实现一个极宽带宽的 CW 系统是很难的。

1.2 较高的多通道分辨力和抗干扰性能

在相同输入功率的条件下,由于冲激信号的总能量分散到很宽的一个频率范围内,因此 UWB 系统发射的功率谱密度要远低于 CW 体制的雷达系统,并且对于其他同时信号或者同时工作的射频(RF)系统不会产生较大的干扰。典型的冲激信号的脉冲宽度非常窄,所以冲激信号的发射持续时间大多数情况下都非常短。相应地,从目标返回的信号具有很短的时间窗口,与视场内其他信号相混叠的机会很小,所引起的信号衰减的可能性也就很小,因此,能够实现较高的多通道分辨力。此外,冲激信号超宽的频带包含多种频率分量,使得其能够有效对抗有意和无意的干扰,因为很难一次干扰频带范围内的每一个频率。即使一些频率成分受到干扰,仍然有大范围的频率分量不受影响。UWB 系统对其他外部信号具有很好的抗干扰能力,同时又对这些信号产生最小的影响。

1.3 较低的截获概率或发现概率

冲激信号具有很低的功率谱密度,这使得侦察截获冲激信号比 CW 系统困难得多,因此冲激信号先天就具备较低的截获或者发现概率,这也是安全和军事应用领域所期望的。

1.4 降低信号衰落

UWB 系统超宽的带宽产生大量的频率分集,能够有效减少信号在某些特定的工作场景和频率点上产生严重的多径衰落引起的信号丢失。例如,室内、乡村或者山区,或者是一些环境下某些频点的信号衰减非常严重以至于影响雷达正常探测,或是在较窄的工作频带范围内存在很多噪声分量影响正常工作。冲激体制的 UWB 系统能够较好地适应复杂恶劣的电磁环境。

1.5 更好的定位和跟踪精度

由于 UWB 系统发射的冲激信号的持续时间非常窄,时间精度较好,因此其定位和跟踪精度比 CW 系统高得多,堪比全球定位系统的授时精度。

1.6 简单、低耗的系统结构

相比于同等带宽的 CW 系统,冲击体制 UWB 系统能够采用一个更为简洁的体系架构来实现,这是由于 CW 体制的超宽带系统需要构建复杂的宽带信号源和混频器,而 UWB 系统发射机的核心部分——信号发生器,仅需要一个简单的脉冲激励源来实现,无须 CW 系统采用的上变频电路来产生,CW 体制的接收机的核心装置——混频器,在冲激体制 UWB 系统中可以采用一个简单的直接数字化采样电路来实现,而不需要借助下变频模块。另外,CW 系统发射机和接收机中复杂

的频综部分也可以省去。

当然,UWB 系统相对于 CW 系统也存在一些缺点。例如,UWB 系统接收机的噪声系数要高于 CW 系统,进而影响接收机的灵敏度和动态范围,限制了这些系统在高灵敏度和大动态范围方面的应用。由于在大带宽范围内需要具有较好信号的保真性,UWB 系统的天线设计也更为复杂。

UWB 雷达和探测系统已经在军事、安全、民生、商业和医药领域有广泛的应用^[1-12],而且不断有各类 UWB 雷达和探测系统被研制出来。正如前文所述,UWB 系统具有高分辨和远作用距离,因此在高分辨感知与探测方面具有诱人的前景。下面列举了 UWB 雷达和探测系统现有和将来的应用方向。

国防和安全领域的应用:重要目标的探测、定位和识别,如飞机、隧道、隐藏的武器、隐藏的非法药品、地下矿藏和未引爆的军火(UXO)等;定位和跟踪可疑人员;监测和鉴别非法活动;访问控制;穿墙成像和监视;建筑物监视和监听。

民用和商业应用:公路、桥梁、建筑物、埋藏地下的管道等民用设施违章建设的探测、识别和评估;物体的探测、定位和识别;资产和财产管理;无线电射频识别(RFID);个人财产监控,如汽车、家具等贵重物品;非法入侵探测;财产追踪;液体体积和高度的测量;原材料的检查、评估和过程控制;地球物理的探矿、测高;汽车和飞行器有效避开障碍物。

医学应用:肿瘤的探测与成像;老年人的健康状况监测;病人的身体检查;医学成像。

UWB 雷达和探测系统包含许多方面,完全地覆盖其详细内容需要厚厚的一本书。本书的目标不是完全覆盖 UWB 雷达和探测器系统的全部内容,而是以一种简洁的方式阐述 UWB 雷达和探测系统的必要组件及相关组件的设计、分析、测试,无论是从事科学研究还是商业用途的读者都能够理解,从而完成 UWB 系统和组件的设计。

本书给出了 UWB 雷达和探测器系统及其组件的相关理论、分析与设计。主要讨论 UWB 系统相关的五个主要方面:系统分析、发射机设计、接收机设计、天线设计和系统集成与测试。本书还给出了基于微波集成电路(MICs)的 UWB 实际系统、组件开发的各种测试全过程,以

阐述相关的理论、分析、设计和某些应用。

本书的结构:第1章介绍 UWB 系统及其可能的应用;第2章是系统分析,包括发射功率估算和距离分辨力;第3章描述发射机的设计、制作和测试,包括冲激脉冲和单周期脉冲信号发生器;第4章主要是接收机的设计,包括选通脉冲发生器、采样器、低噪声放大器和同步采样接收机的设计、制作与测试;第5章阐述两种超宽带天线的制作和测试,包括微波传输带类喇叭天线和 UWB 平面天线;第6章讨论了系统集成、信号处理和测试;最后,第7章是概要和结论。

参 考 文 献

- [1] Skolnik, M. I. : An introduction to impulse radar. Naval Research Laboratory, Washington, DC, NRL Memorandum Report 6755 (Nov 1990)
- [2] Daniels, D. J. : Surface Penetrating Radar. IEE, London (1996)
- [3] Daniels, D. J. , Gunton, D. J. , Scott, H. F. : Introduction to subsurface radar. IEE Proc. 135(4) ,278 - 320 (1988)
- [4] Taylor, J. D. : Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems. CRC, Boca Raton (1995)
- [5] Taylor, J. D. : Ultra-Wideband Radar Technology. CRC, Boca Raton (2001)
- [6] Park, J. S. , Nguyen, C. : An ultra-wideband microwave radar sensor for nondestructive evaluation of pavement subsurface. IEEE Sens. J. 5, 942 - 949 (2005)
- [7] Fontana, R. J. : Recent applications of ultra wideband radar and communications systems. In: Smith, P. D. , Cloude, S. R. (eds) Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 5, pp. 225 - 234. Kluwer Academic/Plenum, New York (2002)
- [8] Yarovoy, A. , Ligthart, L. : Full-polarimetric video impulse radar for landmine detection: Experimental verification of main design ideas. In: Yarovoy, A. (eds.) Proc. 2nd Int. Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, pp. 148 - 155. The International Research Centre for Telecommunication transmissions and Radar (IRCTR), Delft (2003)
- [9] Lee, J. S. , Nguyen, C. , Scullion, T. : A novel compact, low-cost impulse ground penetrating radar for nondestructive evaluation of pavements. IEEE Trans. Instrum. Meas. 53, 1502 - 1509 (2004)
- [10] Warhus, J. P. : Advanced ground-penetrating, imaging radar for bridge inspection

tion. LawrenceLivermore National Laboratory, CA. (Sept 1994)...gov/ dsed/ documents/em/jwpctta93. html

- [11] Azevedo, S. , McEwan, T. E. : Micropower impulse radar. Sci. Tech. Rev. 17 – 29 (Jan/Feb 1996)
- [12] Han, J. W. , Nguyen, C. : Development of a tunable multi-band UWB radar sensor and its applicationsto subsurface sensing. IEEE Sens. J. 7(1), 51 – 58 (Jan. 2007)

第2章 系统分析

2.1 简介

发射功率和目标分辨力是设计一个冲激脉冲体制的 UWB 系统,或简易的 UWB 系统首先要考虑的两个基本问题。对于 UWB 系统在多重分层结构介质目标中的应用,还有一个重要的问题需要考虑,就是电磁波或者发射在分层介质中的传播情况,哪些因素会对接收回波信号产生影响。本章通过系统分析的办法来解决 UWB 系统设计中的这些问题。为叙述方便,分析中假设 UWB 系统要去探测一个具有多层结构的目标,分析的结果将作为 UWB 系统设计中发射机、接收机和天线的参考值。

特别要指出的是,系统分析的目的是粗略地估计 UWB 系统所需要的功率(如所需要的发射功率)和距离分辨力。简单分析不需要进行非常深入、复杂的分析,不需要获知准确的目标特性信息,以及电磁波在多层结构中传播和散射的精确模型。UWB 系统的更多一般性和深入的分析可以通过查找参考文献获悉。发射功率预估主要是基于文献[1]提出的总损耗因式分解法。距离分辨力的预估主要是依据照射脉冲的持续时间,系统所需的脉冲持续时间的最小值是根据多层结构的最小厚度来确定的。

2.2 UWB 系统的工作方式

正如第 1 章提到的那样,UWB 系统有多种应用,因此目前该系统有多种不同的工作方式。为了叙述方便,我们考虑探测一个具体目标的应用,该目标分布在一个多层结构中。图 2.1 显示了一个收发分置的 UWB 系统,该系统具有分离的发射天线、接收天线以及探测目标的

工作方式。UWB 系统用来探测各个介质层和层间的目标回波信号。图 2.1 中第一个交界面是由空气和第一层构成的,第二个交界面是由第一层和目标所在的上表面所构成的,以此类推。和其他探测系统一样,UWB 系统也是由发射机、接收机、天线和数据获取处理单元组成的。

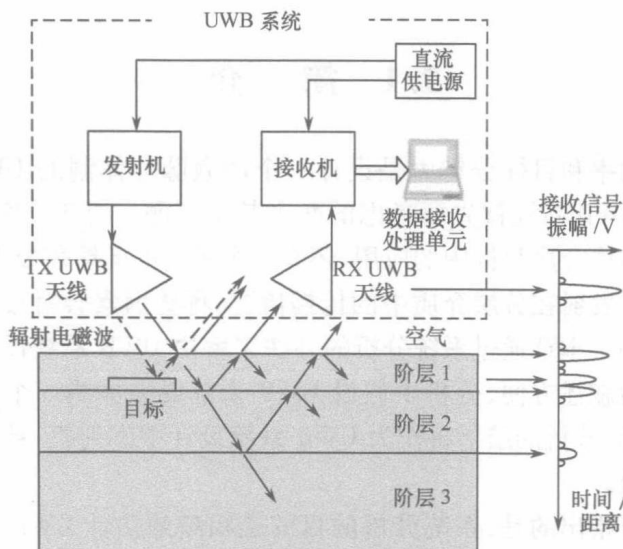


图 2.1 UWB 系统及其探测分层介质目标内部结构时的工作方式

在图 2.1 中,由发射天线辐射的电磁波脉冲照射到目标表面。部分入射波反射回来,经接收天线接收,其余的一部分电磁波透射进第一介质层。这种反射和透射,正如图 2.1 显示的那样,会发生在每一层的交界面,从每个交界面反射的电磁波都会经天线接收。天线的接收信号在时域中可以表现为图 2.1 右边显示的那样。根据这些接收信号,可以识别出每一层交界面的相对位置,甚至目标的内部结构。采用进一步的信号处理后,如图像处理,可以分析得出更多层和各层中目标体的探测信息。

2.3 UWB 信号

冲激体制 UWB 系统的波形选择问题是设计 UWB 系统、天线和电