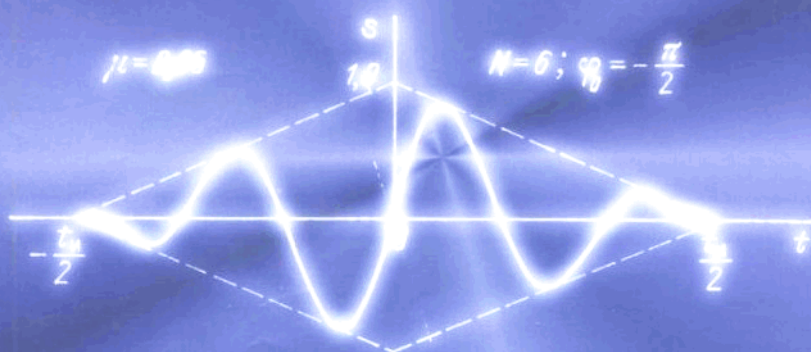


[苏] Л. Ю. 阿斯塔宁 A. A. 考斯泰列夫 著

超宽带雷达测量基础

杨逢春 王积勤 译



国防科技大学出版社

72.44311
235

超宽带雷达测量基础

[苏] Л. Ю. 阿斯塔宁 著
A. A. 考斯泰列夫

杨逢春 译
王积勤



国防科技大学出版社
·湖南长沙·

2041023

2041023

图书在版编目(CIP)数据

超宽带雷达测量基础/[苏]И. Ю. 阿斯塔宁, А. А. 考斯泰列夫著;杨逢春,王积勤译. —长沙:国防科技大学出版社,2000.8
ISBN 7-81024-662-3

I. 超… II. ①阿…②杨… III. 雷达-测量 IV. P225.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 35310 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:卢天贶 责任校对:黄八一

新华书店总店北京发行所经销

长沙市华中印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:7.25 字数:182 千
2000年8月第1版第1次印刷 印数:1—1500册

*

定价:11.00 元

Л. Ю. АСТАНИН
А. А. КОСТЫЛЕВ

**ОСНОВЫ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ**



“Радио и связь”

1989

致谢

由国际著名学者 АСТАНИН Л. Ю. 和 КОСТЫЛЕВ А. А. 教授撰写的“ОСНОВЫ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ”这本专著从统一的观点和方法全面而系统地论述了超宽带雷达的理论和实验研究，测量和模拟以及应用等问题，反映了当代雷达技术研究的前沿。

本书的问世对我国超宽带雷达和雷达反隐身、目标识别以及雷达成像的研究起了重要的推动作用。

АСТАНИН Л. Ю. 和 КОСТЫЛЕВ А. А. 教授特别为本书中译本《超宽带雷达测量基础》在我国出版写了序言。本书的出版得到国防科技大学梁甸农教授，陆仲良教授，赫崇骏教授，何建国教授，郁文贤教授以及空军导弹学院张多林部长和施玉林主任的热情支持和帮助，译者在此对他们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，翻译中的错误和不当之处在所难免，恳请广大读者批评、指正。

译者

2000年4月

序 言

大约在二十多年以前，有人就发表了第一批有关在雷达中应用超宽带信号的论述^[47]。从那时起，许多研究人员相继取得了一系列具有重要科学价值的研究成果，这些成果不仅是非稳态电动力学的理论基础，同时也是超宽带雷达系统的构成原理，这就为不同用途（如搜索和识别宇宙飞行器，导弹和飞机，水面舰艇和潜艇，地雷、隧道、考古的、地质的及其他地下目标，以及建立三维雷达图像等）的超宽带雷达的建立提供了依据^[6,43,52,73,77,90,105,115,125]。超宽带雷达的各种实际应用及其足够高的设计水平证明：超宽带雷达已进入实用阶段。

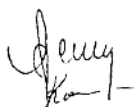
关于超宽带雷达及与之接近的无线电电子学领域，发表了数以千计的论文，其中一部分已附在书后的参考文献中^[6~8,11,25,43,52,53,73,77,91,105,125,131]。然而，从统一的观点阐述超宽带雷达的理论和实验研究以及超宽带雷达系统的建立和应用等基本课题的综述性专著，实际上尚未见发表。本书的主要目的是，将超宽带雷达这一研究方向的现有成就加以概括，并对一些新的理论和实验成果展开讨论，着重研究利用超宽带信号时目标的雷达特性，确切地说，从两个角度，即研究和论述简单、直观而又足够精确的方法来分析雷达系统中超宽带信号的散射、辐射、接收和变换，并介绍超宽带雷达目标散射特性测量装置的构成原理，其中包括构造信号处理的有效算法的问题。由于篇幅所限，作者未能按原来计划将许多有关问题收罗进来，而这些问题的超宽带信号特点亦毫不逊色。特别是，它们属于雷达目标的坐标参数和速度参数的测量范围，看来这些问题是需要单独加以讨论的。

中文版序

《超宽带雷达测量基础》中文版的问世说明中国学者对雷达技术的现代发展方向具有浓厚的科学兴趣。本书以利用动态特性研究信号的时域结构分析方法来建立完整的超宽带信号理论作为自己的主要方向，证实了传统的窄带信号分析方法应用的局限性，并且引入了像广义瞬时频率这样的完全适用于超宽带信号结构分析问题的新描述。

在本书俄文版出版以后，又有一系列专著，如“Introduction in UWB Radar Systems”（《超宽带雷达引论》，CRC，1995）等都证明了这种思路的正确性，同时还召开了以超宽带信号为主题的研讨会和学术会议。随着超宽带仪器技术的显著成就以及新的处理方法的不断出现，我们可以相信，超宽带信号的应用将会获得进一步的发展。

作者祝愿中国研究者在这个艰巨而有意义的道路上取得成功。

 Александр А. А.
Красильников

1995年8月

引 言

超宽带系统的研究和应用是雷达发展中质的飞跃。频谱宽度 Δf 可与其中心频率 f_0 相比较($\Delta f/f_0 \sim 1$)的超宽带无线电信号的利用,可在更高的水平上解决诸如探测和识别目标、建立目标雷达图像这样一些雷达观测问题。这时,起重要作用的不仅是大到千兆赫级的超宽带信号的绝对频谱宽度,而且还有其相对带宽($\Delta f/f_0$)。

抛弃传统的无线电技术的假设(探测信号的窄带性),导致必须重新考虑雷达技术的许多基本概念,从辐射、接收原理、信号处理、雷达目标散射信号的分析,直到雷达分析与综合的数学方法。

在建立超宽带无线电信号的理论模型时,旨在简化窄带信号描述的那些传统特性,即包络和相位已不复适用。此外,基于用简单的信号相移来代替希尔伯特变换的一般的简化复数信号表达式将产生显著的误差。因此,在描述超宽带信号时,应利用实数时间函数及其频谱函数。相应地,解决雷达观测问题与辐射、散射、接收条件下对信号形状变化的分析有着密切的联系,这就要求具备相应的数学模型。

在解决与超宽带探测信号的运用有关的非稳态电动力学问题时,形成了雷达目标和天线的散射、辐射和接收电磁波机理的新概念。采用新方法,首先是获得时域解的方法可确定单个的局部散射中心和辐射中心对目标散射场的基本贡献,这些散射中心或辐射中心的分布和特性决定于所研究的电动力学结构的几何形状,以及超宽带信号的形式^[6,7,11,13,22,25,38,131]。应该指出,上述方法不仅包括作为特殊情况经典的电动力学,而且还有自己的特

点，这就是其解比较简单，且有明确的物理意义^[131]。

根据时空等效性原理，可把目标和天线系统看成是特性取决于目标空间结构和信号时间结构的广义滤波器。辐射和接收状态下天线的特性之间，宽频带和宽波段系统之间的原则区别，以及超宽带信号散射和辐射的许多其他特点，在一些文献中已有明确的阐述^[6,7,99,131]。非稳态应用电动力学是建立超宽带雷达分析和综合方法的基础，它的基本成果是与其中线性动力系统一般理论工具的应用联系着的。凯诺、考斯格利夫和莫法特的工作^[47,6]为之奠定了基础。揭示出目标散射的脉冲特性、过渡特性和其他形式的特性与目标形状、尺寸和取向间的基本联系可将逆散射问题（根据被测的场确定散射体的参数）的解决提高到一个新的水平。这个问题在雷达观测的其他任务（如搜索、位置参数和运动参数的测量；目标识别、分类和判断）中是最常遇到的。因此，利用超宽带信号又可以提高解决各类雷达问题的质量。

必须指出，在电动力学中应用线性系统工具，尤其是脉冲特性又促使重新考虑将频段分为瑞利区、谐振区和高频区这一经典情况。脉冲特性既可描述散射体在局部散射中心出现的高频特性，同时又可描述表示这些散射中心间相互作用的谐振特性。从时间上分辨出脉冲特性的相应要素，就能将这些特性分别加以研究。

书中介绍的目标脉冲特性分解法和近似法就是这些思想的进一步发展，它们都是以非稳态电磁波散射的局部性及其他特点为基础的。

考虑到描述雷达目标及其他雷达信道单元的系统理论的现代发展方向，讨论了输入输出变量和状态变量微分方程形式的数学模型，这种模型在状态空间的许多特性对工程技术人员有很大的吸引力。与雷达目标的其他模型不同，这类模型可直接指出反射信号的模拟方法，利用模拟计算机或只有简单部件，如加法器、

积分器和放大器（衰减器）的专门模拟器确定所实现的目标物理模型的结构和参数。类似地，当用数字计算机进行目标模拟时，用状态变量的微分方程来描述，可直接利用现有的高效算法和柯西型微分方程的求解程序，甚至可将最佳处理算法综合起来，这比之其他描述形式所处理的信号和干扰种类要广泛得多，而且这些算法更便于在计算机上实现。

超宽带信号的应用要求大大改变雷达设备的构成原理。在窄带技术中用来形成、变换和接收雷达信号的大量器件和部件已不适用，首当其冲的是谐振器件，如电桥、环行器、速调管放大器及多数匹配装置等。通常，在信号形成和接收中，频率变换是不可能的。当接收超宽带脉冲信号（毫微秒和亚毫微秒宽度）时，不允许进行信号检波。因此，必须研究新的雷达信号形成、接收和处理原理。在建造采用超宽带脉冲信号的雷达时，采用一些特殊方法对天线或宽带电子仪器进行冲击激励；在接收时，进行超宽带信号的采样比例时间变换等等。可以肯定，研制超宽带雷达专用电子仪器的时刻已经到来。

超宽带雷达的重要特点是，在原则上必须配备先进的计算机系统。首先，这是因为超宽带雷达设备的制造要求超高频系统的频率特性在数千兆赫频带内有异常严格的均匀性，这在硬件技术上是很难达到的，在经济上也是不合算的。因此，要用雷达的计算机系统来修正硬件的特性。其次，在用超宽带雷达解决电动力学逆问题时，可由非稳态散射场的微细结构提取大量信息，而这些信息的精确处理同样要求利用计算机。在该情况下，像雷达目标识别、目标成像这些问题的特殊性质都要求采用复杂的解题算法。

3473/06
内 容 提 要

本书阐述超宽带信号的辐射、散射和接收原理；讨论高信息雷达系统中信号变换的分析方法；着重研究目标的雷达特性，并论述不同形状目标上电磁波非稳态散射的简单、直观和足够精确的分析方法。书中引入了散射的数学模型，特别是状态空间模型，还详细介绍了超宽带雷达特性测量设备的构成原理和利用正则化信号统计处理算法。

书中介绍了距离分辨率约为 2.5cm 的实验测量/计算系统，并论述了测量的或计算的雷达特性在雷达模拟、目标识别及雷达成像中的应用问题。

本书适用于雷达和无线电物理领域的广大科技工作者，亦可供大专院校研究生和教师参考。

目 录

第一章 超宽带雷达信号的数学模型及其在线性系统中的变换理论	
1.1 超宽带信号的定义及性质	(1)
1.2 超宽带无线电信号复数表达的可能性	(13)
1.3 用实数时间函数表示超宽带无线电信号	(20)
1.4 超宽带信号的能量特性和信息特性, 广义频率	(24)
第二章 目标对超宽带信号的雷达特性	
2.1 利用超宽带信号时雷达特性的建模方法	(31)
2.2 超宽带雷达特性的基本性质	(44)
2.3 雷达特性的全局性质和局部性质	(56)
2.4 雷达目标系统特性的分解法	(61)
2.5 脉冲特性与雷达目标形状的关系	(66)
第三章 雷达目标对超宽带信号的散射理论	
3.1 非稳态电动力学问题的解法	(70)
3.2 超宽带无线电信号在导电屏边缘的散射	(74)
3.3 模型目标的脉冲特性	(85)
3.4 有限尺寸目标的脉冲特性	(91)
3.5 光滑表面物体对超宽带无线电信号的散射	(99)
第四章 天线的超宽带特性	
4.1 辐射和接收状态下天线超宽带特性的定义和单元 辐射器的特性	(102)
4.2 对称振子的辐射特性	(106)
4.3 孔径天线的非稳态辐射	(109)

4.4	任意天线的辐射特性和接收特性	(113)
4.5	超宽带信号辐射和接收的一般特点	(118)
第五章 利用超宽带信号条件下雷达测量设备的构成原理		
5.1	雷达特性测量设备的基本类型	(122)
5.2	超宽带探测信号形成器的构成原理	(129)
5.3	超宽带雷达接收设备的构成原理	(138)
5.4	利用超宽带信号时雷达的能量潜力	(145)
5.5	自动化超宽带雷达测量/计算系统	(147)
第六章 超宽带雷达特性测量中的信号处理方法		
6.1	辨识方程式	(154)
6.2	解决超宽带雷达特性估计问题的基础——正则化方法	(162)
6.3	超宽带雷达特性的正则化估计	(174)
第七章 超宽带雷达特性的应用		
7.1	雷达建模	(179)
7.2	目标识别	(189)
7.3	雷达成像	(196)
结束语		(201)
参考文献		(204)

第一章 超宽带雷达信号的数学模型及其 在线性系统中的变换理论

1.1 超宽带信号的定义及性质

在利用实质上为非单色的雷达信号时,可在足够宽的波段内测量目标的雷达特性。根据参考文献[77],所谓雷达特性是指这样一些特性的总称,它描述照射目标的和目标散射的时空信号各个参数之间的关系。

因为目标的雷达特性和目标的特征几何尺寸 a 与所用波长 λ 的比值有很大关系^[51,77],因此雷达信号的参数应根据所观测目标的种类来选择。在 $\lambda \ll a$ 的波段,其特性属于高频区或准光学区;在 $\lambda \approx a$ 的波段,属于谐振区;而在 $\lambda \gg a$ 的波段,属于低频区或瑞利区。现在可将足够宽的频率范围内雷达特性的研究问题具体化为同时在上述三个波段获取目标信息的问题。为此,可以采用频谱中包含满足下式必要频率范围的非单色雷达信号:

$$f_H \gg c/a \gg f_L \quad (1.1)$$

式中, f_H, f_L —信号频谱的上限频率和下限频率; c —光速。

求出信号频谱宽度 $\Delta f = f_H - f_L$ 和中心频率 $f_0 = (f_H + f_L)/2$ 之后,我们引入信号宽带指数的概念,宽带指数定义为

$$\mu = \frac{\Delta f}{f_0} = 2 \cdot \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (1.2)$$

频谱宽度 Δf 可与其中心频率相比较 ($\mu \approx 1$) 的雷达信号称为超宽带信号^[3,6,16]。

作为信号的宽带指数也可以采用比值 $d_f = f_H/f_L$ 或者其对数量度

$$D_f = 10\lg(f_H/f_L)$$

宽带指数 μ 或 d_f 并未囊括信号信息量的全部特性。譬如, 上限和下限频率分别为 $f_H = 30\text{GHz}$ 和 $f_L = 10\text{GHz}$ 的信号 ($\mu = 1.0$) 就不包含尺寸为数米的目标的低频信息。因此, 高信息超宽带信号的综合不仅要求保证 μ 的最大值, 而且还要根据式(1.1)估计频谱的下限频率 f_L 。

我们引入决定不等式(1.1)深度的系数 $h > 1$ 和 $l > 1$: $f_H/h = c/a = f_L l$ 。这时, 所要求的中心频率和频谱宽度应根据目标的特征尺寸 a 来选择, 即

$$\Delta f = (c/a)(h - 1/l), \quad f_0 = (c/2a)(h + 1/l)$$

引入深度系数后, 信号的宽带指数 $\mu = 2(hl - 1)/(hl + 1)$ 与目标尺寸无关, 当 h 和 l 增大时 μ 足够快地趋近于其极限值, 即 $\mu \rightarrow 2$ 。

雷达系统的宽频带超高频部件的研究和测量技术领域的进展保证了毫微秒和微微秒宽度的时间过程的控制, 从而有可能建造 $\mu \geq 1$ 的超宽带信号雷达设备。

具有大频谱宽度 Δf 和高中心频率 f_0 的信号, 在毫米波段和光波波段不满足超宽带性定义^[16,77]。但是, 由于高分辨率 $\Delta r \approx 2c/\Delta f \ll a$, 这些信号也可提供很多有关目标尺寸、形状及其他参数的非坐标信息。我们把这类信号称为高分辨率信号, 从而能将这些信号与脉内调制的雷达信号(换句话说说是复杂信号^[83])区分开来, 后者甚至在对应于传统的信号窄带性假设 ($\mu = \Delta f/f_0 \ll 1$) 情况下有时也被不恰当地称为宽带信号了。

可能有两种超宽带无线电信号的表示和变换途径。一种是采

用设计好的窄带信号复数模型的研究方法,从数量上估计由于不等式 $\Delta f/f_0 \ll 1$ 减弱而产生的效应。信号的复数模型在原则上可在直到 $\mu = 2$ 的任意宽带指数值时建立起来^[16,28,57]。但是,随着 μ 的增大而要求计算非窄带信号的希尔伯特变换,这就使分析运算越来越繁琐。另一方面,现代无线电电子仪器的快速器件和测量设备均具有只占超高频波段振荡周期很小部分的时间离散性,因此可以显示无线电信号的微细结构,而且完全不用通常为确定复数模型分量(包络函数 $A(t)$ 和相位函数 $\varphi(t)$)而进行的检波。

然而,即使为了近似地计算超宽带信号的变换,以及为了获取由于不等式 $\Delta f/f_0 \ll 1$ 减弱而引起的误差估计也应利用众所周知的复数无线电信号分析方法。

第二种建立超宽带信号理论的方法是不采用信号的复数模型,并取消对其频谱的相对宽带性 $\Delta f/f_0$ 的限制。任何作为时间函数的信号均可用实函数 $s(t)$ 来模拟。这种信号的测量过程,本质上是将与空间某一点电磁场场强成比例的量显示在示波器上(必要时利用极化选择),这是通过无检波接收设备来实现的。采用新的信号模型与改变仪器构成原理结合起来,使超宽带信号理论产生了一系列变化。下面我们来讨论信号 $s(t)$ 实数模型所固有的最一般的问题。

我们研究这样的超宽带脉冲信号,它是宽度为 t_p 的有限无线电脉冲,并在中心频率 $f_0 = 1/T_0$ 时包含 N 个高频填充准半周期(换句话说说是时间瓣)(图 1.1)。这种脉冲的频谱宽度在正频率范围内可按 $\Delta f = f_H - f_L = 2/t_p \approx 4/NT_0$ 估算,这时,宽带指数为

$$\mu = \Delta f/f_0 \approx 4/N \quad (1.3)$$

对于图 1.1(a)所示的无线电脉冲,采用三角形包络 $A(t)$ (虚线)和初始相位 $\varphi_0 = -\pi/2$ 的复数表示,其直观性还是令人满意的。

当时间瓣数目减少时,复数包络已不能反映信号的形状了(图

1.1(b),(c))。因此,对宽带指数大于 $\mu \approx 0.66 \sim 1.0$ 的超宽带信号,复数模型是不宜采用的。

超宽带信号模型的重要特点是要求任意无线电信号 $s(t)$ 在零频率上($\omega = 0$)的频谱函数值为零,即:

$$\begin{aligned} S(j\omega) &= \int_{-t_p/2}^{t_p/2} s(t) \exp(-j\omega t) dt \big|_{\omega=0} \\ &= \int_{-t_p/2}^{t_p/2} s(t) dt = 0 \end{aligned} \quad (1.4)$$

实际上,这个条件相当于要求自由空间中的任意电磁场的符号是交替变化的^[59],或者说有限尺寸的辐射器不能辐射直流场。所有辐射和反射的雷达信号模型均应符合条件(1.4)。这就规定了专门的模型种类,称之为无线电信号模型的类。当然,严格说来, $\Delta f/f_0 \ll 1$ 的窄带信号模型也属于这一类,但是由于其结构包含大量的时间瓣 $N \gg 1$,条件(1.4)通常以足够的精度得到满足,因此对于窄带信号这里就不讨论了。比如,对于 $N = 6$ 的信号(图 1.1(a)),条件(1.4)可得以满足($\varphi_0 = -\pi/2$ 时是精确的, φ_0 为其他值时是近似的),而对于 $N = 2 \sim 3$ 的信号(图 1.1(b),(c)),条件(1.4)可能遭致破坏,这取决于信号模型的“相位”参数 φ_0 。

当满足条件(1.4)时,信号频谱的下限频率 $f_L > 0$,故信号的最大宽带性是有限的: $\mu < 2$ 。这就将超宽带无线电信号同 $f_L = 0$ (直流) 和 $\mu = 2$ 的视频脉冲区分开了^[91,95],其实满足条件(1.4)的无线电信号能够辐射和沿波导传输。

同复数模型一样,超宽带信号的实数模型同属于具有可积能量的信号空间 $|L^2|$ 。根据该空间的度量标准,信号间距离的确定可归结为计算其相关函数。为了阐述超宽带信号应用的特点,我们讨论单参数信号,例如宽度为 t_p ,重复周期为 T_r 的无线电脉冲