



HAOKUANDAI CHONGJI WUXIANDIAN XINHAO JIANCE JISHU

# 超宽带冲激无线电 信号检测技术

王明阳 王军良 张静 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

013032934

TN911.23  
57

# 超宽带冲激无线电信号 检测技术

王明阳 王军良 张静 著



国防工业出版社

·北京·



北航

C1640731

TN911.23

57

013035834

## 内 容 简 介

超宽带信号常常被隐蔽在环境噪声和其他干扰信号中,难以检测,是一种很有军事应用前景的低截获、低检测概率信号。本书较为系统地介绍了超宽带冲激无线电信号的基本概念,研究了在负信噪比且没有先验信息或仅有部分先验信息条件下的超宽带冲激无线电信号检测技术,提出了若干种检测原理及方法,同时提供了相应的仿真验证结论。

本书内容专业性强、理论推导严谨、仿真验证充分,可供相关专业研究生学习,也可作为科技人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

超宽带冲激无线电信号检测技术/王明阳,王军良,  
张静著. —北京:国防工业出版社,2013. 2

ISBN 978-7-118-08344-6

I. ①超... II. ①王... ②王... ③张... III. ①宽  
带通信系统—无线电信号—信号检测—研究 IV. ①TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 013537 号

※

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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 9 字数 117 千字

2013 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 31.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

本书所研究的超宽带(UWB)信号均指超宽带冲激无线电(UWB-IR)信号。

UWB系统以低占空比的超短冲激脉冲作为载体,无需载波调制,采用跳时扩谱(TH-UWB)或直接序列扩谱(DS-UWB)技术实现信息传输。与传统无线电系统相比,UWB具有更低的功率谱密度和更宽的带宽,以及高数据率、强抗干扰等特点。UWB信号常常被隐蔽在环境噪声和其他干扰信号中,难以检测,是一种很有军事应用前景的低截获、低检测概率信号。超宽带无线电技术在高速军事通信、无人机低截获数据链、高分辨率雷达/定位系统中已经得到实际应用。因此在非合作条件下,研究对UWB无线电信号的检测技术,具有重要的军事意义。

本书研究了在负信噪比且没有先验信息或仅有部分先验信息条件下,UWB无线电信号的检测问题。全书主要内容如下:

介绍了UWB信号模型,研究了基于正交M元TH-UWB接收机的性能,总结了UWB信号主要特点和UWB信号非合作检测的思路。

在全盲和负信噪比情况下,研究了基于希尔伯特-黄变换(HHT)的UWB信号检测方法。仿真实验表明,在进行UWB信号检测时,与传统小波分析方法和Wigner-Ville分布相比,希尔伯特-黄变换具有优越性。

利用信号和噪声在固有模态函数域中有不同的性态表现这一点,提出了一种固有模态函数积检测器(IMFs product detector),在低信噪比和背景噪声分布未知条件下,IMF积检测器优于Teager能量算子(TEO)检测器。参考Rosenfeld子带乘积理论,提出了基于固有模态函数域滤波(IMFDF)方法,用于对带噪信号的边缘检测,与小波域滤波方法相比,IMFDF相对简单、计算复杂度小。

提出了可用于全盲信号检测的CCIO测度准则和两种基于参数可调非周期随机共振(PASR)的UWB信号检测方法。

利用PASR系统输出信号和输入信号最匹配时随机共振最显著这一现象,区别于Collins互相关方法,提出了基于输入(信号+噪声)输出互相关的ASR测度方法,即CCIO方法。利用线性响应理论(LRT),推导了CCIO测度方法的性能,验证了CCIO测度下的PASR方法可以实现全盲负信噪比(低于-10dB)

非合作 UWB 信号检测。

在 CCIO 准则下,提出了基于 PASR 的 DS - UWB 系统码序列检测方法。对于低信噪比 DS - UWB 而言, PASR 检测器逊于匹配滤波检测器,但当匹配滤波器存在较大失配时(出现同步误差),结论完全相反。研究发现: PASR 方法的检测性能随采样频率的提高而改善。此外,本书还利用多窗并行检测的思想,提出了一个基于 PASR 的多时窗检测器( PASR - MWD)以用于 TH - UWB 信号检测。仿真试验表明,在负信噪比情况下, PASR 多时窗检测器优于多辐射计组和固有模态函数积检测器,但逊于匹配滤波检测方法。

在负信噪比和全盲的条件下,研究了基于分段自相关积累( PACA)的 UWB ( DS - UWB 和 TH - UWB)信号检测方法。经过严格数学推导,指出了 TH - UWB 信号的 PACA 函数不但在字符周期整数倍处出现离散峰值,而且按 3 个峰值(一大峰值左右对称出现小峰值)成对出现,大峰和小峰的间隔就是 PPM 调制时间偏移。仿真验证了通过增加积累时间,实现负信噪比 UWB 信号检测的可行性。

研究了仅需已知字符周期情况下基于特征值分解方法的 UWB 码序列波形检测方法,首次理论推导了 DS - UWB、TH - UWB 特征值和码序列波形的分布情况。提出了基于特征值分解的 TH - UWB 码序列波形估计方法,指出了在时间窗和字符非同步情况下,将会出现三个大的特征值,对应的三个特征向量反映了二元字符跳时序列波形之和的特性。利用矩阵扰动理论,证明了码序列波形估计误差的引理,分析了波形估计误差和输入信噪比、积累窗个数的关系。

周一宇教授、卢启中研究员、栗毅教授等对本书的写作给予了极大的鼓励和支持;徐博候教授与康艳梅博士分别在检测二进制 PAM 信号传输和二维 Duffing 随机共振系统检测方面为本书提出了许多有益建议,在此表示深深的感谢!本书的若干研究成果是在与国防科技大学李宗华博士、张国柱博士、黄可生博士等交流讨论的基础上得到的,在此一并对他们表示衷心的感谢!

感谢国防工业出版社的工作人员为本书的出版所付出的辛勤劳动!

由于水平有限,时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请读者不吝批评指正。

作者

2012 年 10 月 29 日

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 UWB 基本概念.....	1
1.1.1 UWB 的定义 .....	1
1.1.2 UWB 技术的发展历程 .....	3
1.2 UWB 装备的研究现状.....	4
1.2.1 UWB 主要应用领域 .....	4
1.2.2 UWB 军用装备研究现状 .....	5
1.3 UWB 通信理论研究现状.....	8
1.3.1 波形设计和调制样式.....	8
1.3.2 定时同步 .....	9
1.3.3 RAKE 接收和多径分集 .....	9
1.3.4 UWB 多用户检测技术 .....	9
1.3.5 信道估计 .....	10
1.3.6 发射参考和 PWAM 信号 .....	10
1.3.7 多天线 UWB 系统 .....	11
1.3.8 多级扩块 UWB 多址.....	11
1.4 LPI/D 信号检测相关技术的研究现状.....	12
1.4.1 能量检测器 .....	12
1.4.2 时频分析 .....	13
1.4.3 基于信号相关特性的检测方法 .....	13
1.4.4 混沌检测 .....	14
1.4.5 基于随机共振的检测方法 .....	15
1.4.6 基于希尔伯特—黄变换的检测方法 .....	16
1.5 本书的工作.....	16
<b>第 2 章 UWB 无线电信号模型</b> .....	20
2.1 UWB 信号模型 .....	20

2.1.1	DS - UWB 信号模型	20
2.1.2	TH - UWB 信号形式	21
2.2	基于正交 $M$ 元 PPM 数字冲激无线电多址接收机	22
2.2.1	基于多相关器的 DIRMA 接收机结构	22
2.2.2	正交 $M$ 元 DIRMA 接收机的性能	23
2.2.3	数值仿真	27
2.3	UWB 信号的特点和非合作检测方法的思考	29
<b>第 3 章</b>	<b>基于希尔伯特—黄变换的 UWB 信号检测</b>	<b>32</b>
3.1	希尔伯特—黄变换	33
3.1.1	经验模式分解	33
3.1.2	希尔伯特分析	35
3.1.3	HHT 的物理意义	36
3.2	基于固有模态函数积检测方法	38
3.3	固有模态函数域滤波	39
3.3.1	IMFDF 的提出	39
3.3.2	IMFDF 方法	39
3.3.3	IMFDF 方法的计算复杂度	40
3.4	仿真实验	42
3.4.1	基于 HHT 的 UWB 信号检测仿真	42
3.4.2	固有模态函数积检测器仿真	46
3.4.3	固有模态函数域滤波方法的仿真实验	48
<b>第 4 章</b>	<b>基于随机共振的 UWB 信号检测</b>	<b>51</b>
4.1	非周期随机共振系统模型、概率密度和响应速度	54
4.2	基于噪声强度可调 SR 系统的 UWB 信号检测	58
4.3	参数可调非周期随机共振系统	60
4.4	CCIO 测度方法	61
4.4.1	Collins 相关方法	62
4.4.2	CCIO 测度方法及理论性能	62
4.5	CCIO 准则下基于 PSAR 的全盲 UWB 信号检测	64
4.5.1	CCIO 准则下基于 PSAR 的全盲信号检测思路	64
4.5.2	CCIO 准则下全盲 UWB 信号检测的仿真实验	66
4.6	基于 PASR 的 DS - UWB 码序列的检测器	73
4.6.1	失配系数对检测性能的影响	75

4.6.2	采样频率对检测性能的影响 .....	76
4.7	基于 PASR 的多时窗检测器 .....	77
4.8	PASR 后相关方法 .....	79
<b>第 5 章</b>	<b>基于分段自相关方法的 UWB 信号检测 .....</b>	<b>83</b>
5.1	简化的单用户 UWB 信号模型 .....	84
5.1.1	单用户 DS - UWB 模型 .....	84
5.1.2	单用户 TH - UWB 模型 .....	84
5.2	分段自相关积累方法 .....	85
5.3	UWB 信号 PACA 函数的周期特性 .....	86
5.3.1	DS - UWB 信号的 PACA 函数的周期特性 .....	86
5.3.2	TH - UWB 信号的 PACA 函数的周期特性 .....	87
5.4	PACA 方法性能分析 .....	92
5.4.1	噪声的 PACA 输出的方差 .....	92
5.4.2	DS - UWB 信号的 PACA 方法的性能 .....	94
5.4.3	TH - UWB 信号的 PACA 方法的性能 .....	96
5.5	仿真实验 .....	97
5.5.1	DS - UWB 信号仿真 .....	97
5.5.2	TH - UWB 信号仿真 .....	99
<b>第 6 章</b>	<b>基于特征值分解的 UWB 码序列检测和盲同步 .....</b>	<b>103</b>
6.1	特征值分解方法估计码序列的基本思想 .....	104
6.2	基于特征值分解的 DS - UWB 系统码序列估计 .....	104
6.3	基于特征值分解的 TH - UWB 系统码序列估计 .....	106
6.3.1	非同步的情况 .....	107
6.3.2	同步的情况 .....	109
6.3.3	帧周期、码元宽度、跳时码的估计 .....	110
6.4	基于矩阵扰动理论的码波形估计误差分析 .....	110
6.5	仿真实验 .....	113
6.5.1	DS - UWB 的情形 .....	113
6.5.2	TH - UWB 的情形 .....	115
6.5.3	波形估计误差仿真 .....	118
后记	.....	121
参考文献	.....	123



# 第 1 章 绪 论

本章先给出超宽带(UWB, Ultra Wide Band)和超宽带冲激无线电的基本概念,然后总结 UWB 通信理论和装备的研究现状,分析了已经用于或将来可能用于低截获概率信号检测的技术,最后介绍了本书的工作。

## 1.1 UWB 基本概念

### 1.1.1 UWB 的定义<sup>[5,6]</sup>

早在 1989 年,美国国防部(DoD, Department of Defense)把 UWB 定义为绝对带宽至少为 1.5GHz,或 -20dB 相对带宽超过 25% 的系统<sup>[5]</sup>。

1998 年美国联邦通信委员会(FCC, Federal Communications Commission)制定并公布了 UWB 的相关规则和协议,它对 UWB 的定义与国防部的定义有所区别。第一个报告和规定(R&O, First Report and Order)于 2002 年 2 月 14 日颁布,并于同年 4 月实施<sup>[6]</sup>。R&O 定义了 3 种 UWB 系统,即图像系统、通信和测量系统、车载雷达系统。

FCC(2002)所定义的超宽带无线电(UWB Radio)信号,是指相对带宽  $BW_r > 0.20$  或绝对带宽  $BW_a > 500\text{MHz}$  的电磁波信号。令  $f_H$ 、 $f_L$  分别是功率谱密度衰减为 -10dB 点对应的上限频率和下限频率,绝对带宽定义为  $BW_a = f_H - f_L$ ,相对带宽(也称分数带宽)定义为  $BW_r = \frac{BW_a}{2f_H + f_L}$ 。根据文献[6],当 UWB 系统中心频率  $f_c > 2.5\text{GHz}$ ,要满足 FCC 超宽带的定义,需要 -10dB 带宽至少 500MHz;当 UWB 系统  $f_c < 2.5\text{GHz}$  时,需要相对带宽(分数带宽)至少大于 0.2。

根据 FCC(2002 年)所定义的“超宽带无线电”是从信号带宽的角度定义无线电信号,没有指明相应的实现方式。按技术实现的方式分,UWB 信号主要可以分成两类:第一类,超宽带载波调制信号,例如常用于超宽带 SAR (Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达)合成孔径雷达的线性调频(LFM)信号<sup>[257]</sup>;第二类,超宽带冲激无线电(UWB - IR, Ultra Wide Band - Impulse Radio)信号,该类信号不采用载波调制,主要是利用超短冲激脉冲换取超宽频谱,例如,ns 量级脉

宽的高斯型脉冲信号<sup>[1,3]</sup>。本文所指的超宽带(UWB)信号,若无特别声明,均指满足 FCC(2002 年)规定的超宽带冲激无线电信号。

UWB - IR 系统,需要超短的脉冲(ns 量级)波形,且不需要正弦载波,也不需要中频处理,可以在基带工作。利用超短脉冲作为信息载体,从而拥有超宽的频谱,因此 UWB 无线电给雷达/定位和通信系统带来了独特的优势:提高穿透障碍物的能力(反隐身);可以达到 cm 量级的超高精度测距;高数据率通信的潜能;UWB 设备的小尺寸和低功耗。

与传统无线电系统相比,UWB 具有更低的功率谱密度和更宽的带宽,具有高数据率、强抗干扰和低截获的特点。通常,UWB 无线电信号射频带宽可达 1GHz 以上,且平均功率为  $\mu\text{W}$  到  $\text{mW}$  量级,信号常常被隐藏在环境噪声和其他信号中难以检测,是低截获/检测概率(LPI/D, Low Probability of Interception/Detection)信号<sup>[1-3]</sup>。表 1-1 给出了单用户情况下 TH(Time Hopping) - UWB(跳时超宽带)系统、宽带 CDMA 系统、IS - 95 直扩系统这 3 种系统,在完全同步和带宽先验已知情况下,虚警概率  $P_{fa} = 1 \times 10^{-2}$ 、检测概率  $P_d = 0.9$  时,使用能量检测器实现检测所需的最低信噪比<sup>[4]</sup>。

表 1-1  $P_d = 0.9$ 、 $P_{fa} = 1 \times 10^{-2}$  时 3 种系统  
使用能量检测器所需的最低信噪比<sup>[4]</sup>

系统	指标	信噪比/(dB - Hz)	信噪比/dB
TH - UWB	带宽 4GHz	107.78	14.995
宽带 CDMA	带宽 5MHz, 码率 3.6864Mcps	75.12	6.502
IS - 95	带宽 1.25MHz, 码率 3.6864Mcps	70.11	8.205

注:假如按信号功率与噪声功率定义的信噪比为  $\rho$ , 信号带宽为  $BW_a$  (Hz), 那么 dB - Hz 意义上的信噪比为  $10 \cdot \lg(\rho \cdot BW_a)$ 。

表 1-1 表明,UWB 系统与宽带 CDMA 系统和 IS - 95 系统相比,具有更强的隐蔽性,更难以截获。如果要截获 UWB 信号,只有在 UWB 信号的信噪比较 IS - 95 直扩系统高 37dB - Hz 情况下,才能实现检测。

UWB 无线电采用伪随机直扩或跳时技术,使发射信号具有很低的功率谱密度(PSD, Power Spectral Density)。对于大多数窄带低噪声检测系统而言,超宽带信号的功率谱密度和白噪声极为类似;即使对于宽带接收系统,UWB 信号也是很难检测的。合作式的 UWB 接收机,通过相干检测的方法找出被噪声淹没的微弱信号,并实现信息的重构和恢复。

由于 UWB 信号的低截获特性,在码序列未知、脉冲波形未知的全盲情况下,UWB 信号的非合作侦收将变得更加困难。常用的侦察系统由于其针对的信号是基于正弦波调制的相位编码信号、线性调频或直接扩频通信信号等。因此,当常用的侦察系统面对超宽带辐射源的时候,将失去优势,使该武器系统的威胁性大幅度降低,研究对 UWB 系统的侦察是一项紧迫的任务。

TH - UWB 现有产品和主流的研究都是基于利用伪随机(PN)码跳时的方案。在理论界,也有人提出了利用混沌序列决定脉冲出现时刻的“混沌脉位调制(CPPM)”<sup>[7-9]</sup>和在每一个时间帧内进行混沌跳时的方案,即伪混沌跳时(PCTH)方案<sup>[10-12]</sup>。混沌跳时系统和伪随机跳时系统相比,它更隐蔽、更难干扰和截获,有良好的军事应用前景;但因其接收机更为复杂,实现比较困难,目前尚无现成的通信设备出现。

本文所研究的非合作超宽带冲激无线电信号检测技术,主要是研究在低信噪比、先验信息未知或部分已知条件下对主流的 DS(Pirect Sequence) - UWB(直接序列超宽带)、TH - UWB 系统的信号检测问题。

### 1.1.2 UWB 技术的发展历程

尽管在过去 10 年,UWB 才激发人们的研究兴趣,但 UWB 具有和无线电一样长的历史。在马可尼发明无线通信以前,1886 年,海因里希·鲁道夫·赫兹利用火花隙设备发射大带宽信号,并在相距几米远的地方检测到这种振荡。这被认为是最早的 UWB 通信实例。Ross 在 1973 年的专利奠定了 UWB 通信的基础。文献[2]给出了 UWB 雷达和通信早期的开拓性的工作。

超宽带技术的主要发展历程:

20 世纪 50 年代,微波 N - 端口(林肯实验室)微波冲激响应分析。

1963 年,G. Ross——博士论文“时域电磁场”,UWB 理论获重大突破。

1972 年,Robbins——美国基础专利:UWB 单脉冲检测器,专利号 No. 3,662,316。

1973 年,Ross——美国基础专利:UWB 通信,专利号 No. 3,728,632。

1974 年,Morey——美国基础专利:UWB 探地雷达,专利号 No. 3,806,795。

1978 年,Bennett、Ross 的论文“时域电磁场及其应用”,这是人类第一次论证自由空间的 UWB 通信系统。

1984 年,Ross/Fontana 合作进行 UWB 通信系统的研发(MSSI/ANRO)。

1986 年,Ross/Fontana 第一次物理实现了“短脉冲”UWB 通信系统。

1988 年,美国时域公司(TDC)将 UWB 提交给 FCC。

1990 年,OSD/DARPA(国防部长办公室/美国国防高级研究计划局)发布了“UWB 技术评估”。

1993年, Aether Wire&Location 公司推出第一个 UWB 芯片组。

1994年, 发布第一个公开的 UWB 通信项目。

1998年, FCC 发出 UWB 调查通知。

2000年, FCC 发布制定 UWB 规则的建议。

2002年, FCC 批准 UWB 商用化。

1994年以前的 UWB 系统的早期研究, 属于美国政府的机密计划, 1994年政府同意用于民用研究。2001年以前 UWB 设备的研究主要局限于雷达系统, 特别是军用雷达系统。但在 2002年春天, 情况发生了戏剧性的变化, FCC 允许 UWB 无线电进入商业领域, 并授权了宽达 7.5GHz 的带宽。

2002年1月, IEEE 成立了 802.15.3 SG3a 工作组, 专职负责 UWB 标准的制定。2003年, SG3a 工作组把 23 个提案融合成了两大方案: 一种是美国多谱公司(MSSI)、XtremeSpectrum 公司(2003年被摩托罗拉收购)等小公司为主提出的冲激无线电(IR, Impulse Response)方案; 另一种是 Intel 和 TI 等大公司为主提出的多频带正交频分复用方案(OFDM)。后者主要基于保留窄带系统设备升级和商业的考虑, 保留了载波调制的思想, 提出将可用的 7.5GHz 频段化成 10 多个 500MHz 的子带, 在每个子带上利用现有的 OFDM(Orthogona Frequency Division Multiplexing, 正交频分复用)技术实现宽带无线电的方法。前者具有良好的应用前景, 其主要包括直接序列扩谱超宽带(DS-UWB)和跳时超宽带(TH-UWB)两种体制。DS-UWB 沿用成熟的 DS-CDMA 技术, 实现比较方便; TH-UWB 系统和 DS-UWB 一样采用冲激脉冲作为载体, 不同的是利用跳时扩谱技术。TH-UWB 容易获得比 DS-UWB 更高的处理增益和更低的功率谱密度, 具有更强的抗干扰、抗截获能力, 因而更受重视。

## 1.2 UWB 装备的研究现状

### 1.2.1 UWB 主要应用领域

#### (1) 军事和政府应用

按美国国防部的说法<sup>[5]</sup>, 军用 UWB 系统中, 并没有频率和发射功率的硬性规定。UWB 在军事和政府的主要应用领域有以下几个:

- 手持或组网的 LPI/D 战术无线电。
- 非视线[Non-LOS(Line of Sight)] LPI/D 地波通信。
- LPI/D 测高雷达, LPI/D 避障雷达。
- 入侵检测雷达(Intrusion Detection Radar)。

➤ 精确定位系统。

➤ LPI/D 无人机数据链 (UAV/UGV) (Unmanned Aerial Vehicle/Unmanned Ground Vehicle)。

➤ 近距离引信 (Proximity Fuzes)。

➤ LPI/D 无线内部通信系统。

## (2) 商业应用

巨大的“新带宽”空前满足了无线通信、无线网络、雷达成像和定位系统在低功耗应用场合的需求<sup>[13]</sup>。在商业无线通信中, FCC 规定很低的功率(低于  $-41.3\text{dBm}$ ), 允许 UWB 系统、全球定位系统 (GPS, Global Positioning System) 和 IEEE 802. 11 无线局域网 (WLANs, Wireless Local Area Networks) 共同分享  $3.6\text{GHz} \sim 10.1\text{GHz}$  的带宽。尽管 UWB 信号在高功率时, 可以传输更远的距离, 但当前 FCC 规则仅授权了低功率短距离的高数据率传输, 在  $10\text{m} \sim 15\text{m}$  的距离实现  $110\text{Mb/s}$  数据率传输。IEEE802. 15 工作组负责制定室内(家庭和办公室) UWB 无线多媒体传输规则。和无线蜂窝系统频率再利用相似, 低功率、短距离 UWB 通信也能提供高的空间通信容量(空间通信容量指每秒每平方米上的比特数)。UWB 在商业上的主要应用包括以下几个:

➤ 高速(大于  $20\text{Mb/s}$ ) WLANs(无线局域网)。

➤ 商业飞行器中的测高雷达/避障雷达。

➤ 防撞传感器。

➤ 附属应用(智能传输系统、电子签名、其他智能应用)。

➤ 精确定位系统。

➤ 工业射频监视系统。

## 1.2.2 UWB 军用装备研究现状

主要用于通信和定位目的的 UWB 数字接收机的研究机构有麻省理工学院、南加利福尼亚大学超宽带无线电通信实验室、加州大学伯克利分校 UWB 工作组、Intel 公司、多谱公司 (MSSI)、时域 (Timedomain) 公司、Aether Wire & Location 公司等。其中, 多谱公司和时域公司仅致力于冲激无线电方面的研发, 承接军方和政府的研究项目较多。UWB 技术研究涉及 UWB 信号的产生、调制、辐射、传播、检测等诸多方面。多谱公司以开发通信解决方案和高清晰度雷达见长, 目前已成功开发多种军用超宽带无线通信、定位系统, 工作频段包括  $30\text{MHz} \sim 50\text{MHz}$ 、 $225\text{MHz} \sim 400\text{MHz}$ 、 $1300\text{MHz} \sim 1700\text{MHz}$ 、 $2200\text{MHz} \sim 2700\text{MHz}$ 、 $5400\text{MHz} \sim 5900\text{MHz}$ 、 $9000\text{MHz} \sim 11000\text{MHz}$ , 信号带宽为  $20\text{MHz} \sim 2000\text{MHz}$ 。

## 1. UWB 在无人机上的应用<sup>[14~20]</sup>

UWB 在无人机上主要应用在避撞雷达、测高雷达和高速数据链路 3 个方面。

多谱公司推出了 C 波段避撞/避障 (Collision Avoidance/Obstacle Avoidance) 雷达, 频段为 5.4GHz ~ 5.9GHz, 500MHz 瞬时带宽, 8.9% 分数带宽。在 0.25W 额定峰值功率、5 $\mu$ W 的平均功率、每秒 1 万个脉冲情况下, 实现 300 英尺 (约 90m) 的探测距离如图 1-1 所示。

多谱公司研制了 L-波段高度计, 频段为 1.3GHz ~ 1.7GHz, 400MHz 瞬时带宽, 27% 分数带宽。采用 1W 峰值功率、25 $\mu$ W 平均功率 (占空比为  $4 \times 10^4$  量级)、每秒 1 万个脉冲; 大约 5000 英尺 (1500m) 的作用距离, 1 英尺 (30cm) 的分辨率。

多谱公司在 2000 年实现了无人驾驶汽车 (UGV) 和无人机 (UAV) 的 UWB 高速数据链路。上、下行链路均采用 C 波段, 400MHz 的瞬时带宽, 27% 的相对带宽。采用 TDMA 分组突发方式, 上行传输地面站对无人机的命令和控制信号, 传输速率为 115.2kb/s; 下行传输视频信号, 速率为 1Mb/s ~ 25Mb/s。额定峰值功率为 2W, 采用全向天线, 视距 (LOS) 通信距离大于 5mile (约 8km)。

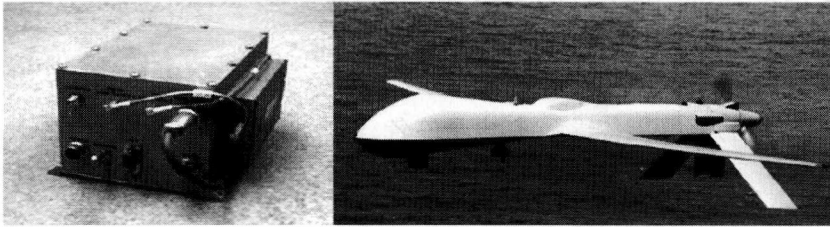


图 1-1 多谱公司的无人机数据链路设备和“掠食者”无人机

2005 财年, 美国海军在“小型创新研究项目 (SBIR, Small Business Innovation Research)”中也资助了时域公司无人机高速数据链路的研究。这就是代号为“N051-029-1371”的“低截获概率/低检测概率 (LPL/LPD, Low Probability of Interception/Low Probability of Detection) 数据链”项目。该项目要实现无人机到地面站的 30km 的 UWB 无线电通信链路<sup>[19]</sup>。从无人机 (UAV) 到地面下行主要传输音频、数据和视频; 从地面到无人机的上行链路可以传输命令和控制指令。该方案考虑到了几种关键技术, 包括: 使用体积小、重量轻的天线阵, 高增益小方向性天线, 比如圆盘单极天线 (2GHz ~ 12GHz 带宽, 每个天线增益为 5.7dBi) 或腔体宽带双极天线; 宽带低功率谱信号设计技术; 高精度快速捕获技术; 多个瞬时高速相关/采样通道技术。

在该项目之前,时域公司已经实验论证了几个长距离地-地视线(LOS)地面站-无人机链路,采用了高增益的全向天线,近似距离为15km的UWB通信。近距离实验方面,时域公司采用非常小的全向天线,有效全向辐射功率(EIRP, Effective Isotropic Radiated Power)为9.5dBm=9mW,验证了地面站-无人机的视线(LOS)通信系统,距离约为1km。

## 2. UWB 在军事短波通信中应用

多谱公司开发了一套短波UWB通信电台,开辟了VHF频段军用短波电台的新途径(图1-2)。频率为30MHz~45MHz,40%的分数带宽,利用地表面/地波传播的非视线(Non-LOS)无线电。半双工,采用前向分组时延模型,实现128Kb/s[CVSD(Cantinuac Variable Slope Delta Modulation,连续可变斜率增量调制)语音]、115.2kb/s(数据)通信。10W~35W的峰值功率情况下,采用全向天线,实现非视距通信距离大于10mile(约16km),通信距离与地形有关。若用海水作为介质,性能有大的改善。

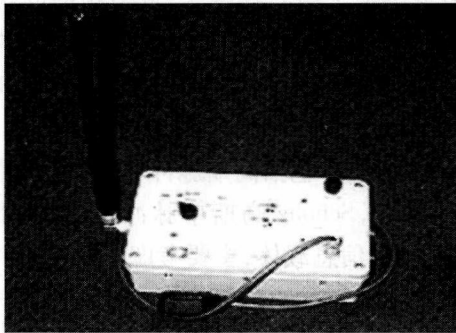


图1-2 多谱公司研发的UWB短波电台

## 3. UWB 在精确定位中应用

多谱公司所披露的有源定位设备参数为:时差定位;L波段,400MHz瞬时带宽,27%分数带宽(图1-3)。脉冲采取分组突发方式,100次更新/s。4W峰值功率,可以实现低于1ft(约0.3m)的分辨力,作用距离为室外达到2km;室内5dB~25dB穿墙衰减,定位距离达到300ft(约91m)。

国内对UWB的研究成果主要集中在UWB信号产生及有效辐射方面。国防科技大学、南京船舶雷达研究所开展了微功率冲激雷达的研究。电子科技大学、核工业九院在大功率窄脉冲产生器、超宽带天线研究方面取得了进展。总参通信部开展了“十五”技术预研课题“极窄脉冲通信技术”,电子部十所也开展了预研课题“超宽带通信技术”。2001年,我国也把UWB无线电通信的关键技术列入了“十五”863计划的通信技术主题。

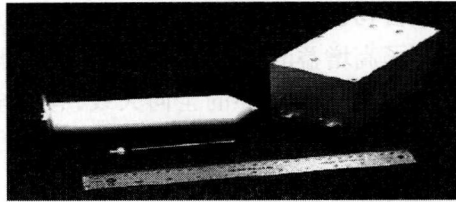


图 1-3 多谱公司研发的 UWB 定位设备

在 UWB 信号侦察装备研制方面,国内外尚未见到报道。

## 1.3 UWB 通信理论研究现状

### 1.3.1 波形设计和调制样式

UWB 系统脉冲波形决定了中心频段、带宽与频谱形状。当然,最为理想的情况是产生 Dirac Delta 冲激函数,但物理上几乎不可能实现。目前采用的信号形式主要有 3 种:高斯函数类、扁球函数类(Prolate spheroidal function)和修正厄密特多项式函数类(Modified Hermite Polynomial Function)。

通常采用的 UWB 脉冲波形包括高斯脉冲、高斯单脉冲(高斯脉冲的 1 阶导数)和高斯脉冲的 2 阶导数, Scholtz 高斯单脉冲(为高斯脉冲 2 阶导数的修改版)<sup>[21]</sup>。选择高斯脉冲作为信息载体,主要考虑两方面:一方面是高斯脉冲具有最小的时间带宽积,且提供最大的距离分辨率;另一方面是高斯脉冲容易用天线辐射实现<sup>[24]</sup>。

$M$  元脉冲位置调制(PPM, Pulse Position Modulation)通信系统<sup>[52]</sup>,随着调制元  $M$  的增加,PPM(脉冲位置调制)适合功率受限的应用场合。PPM 在早期的 UWB 被广泛使用,因为当时很难实现负脉冲。另一个不需要负脉冲的调制是开关键控(OOK, On - Off Keying)<sup>[25,26]</sup>,发射字符“1”时,仅发射一个脉冲;否则“0”,不发射脉冲。对于二进制 PAM(Pulse Amplitude Modulation, 脉冲幅值调制),采用双极性描述二进制字符,比如 BPSK(Binary Phase Shift Keying, 双相移相键控)或双极性脉冲信号。

为了把 UWB 引入多址(MA, Multi - user Access)信道,有人提出给不同用户分配不同跳时序列的 TH(Time Hopping)多址方案<sup>[23]</sup>。每时帧中脉冲的位置由伪随机跳时序列和 PPM 调制时移决定,这种方式也被称为 TH - UWB<sup>[21]</sup>。沿用的 DS - CDMA 的概念,若仅仅发射双极性冲激脉冲,得到 DS - UWB 体制<sup>[27]</sup>。文献[28、29]提出单载波/多载波(SC/MC, Single Carrier/Multi Carrier)UWB 概



念。DS-UWB 信号和 TH-UWB 信号的功率谱密度的解析表达式和仿真由文献[30、31]给出,结果表明在扩频码(跳时码)足够长的情况下,DS-UWB 和 TH-UWB 功率谱更接近白噪声。

为了根据期望的频谱特性来设计脉冲形状,常用的有两个办法<sup>[3]</sup>,即载波调制和基带脉冲的模拟(数字)滤波。前者依赖于 UWB 收发信机的本振,通过载波频率偏移/载波频率抖动(CFO/CFJ, Carrier Frequency Offset/Jitter)的途径实现。在多带 UWB 系统中,多 CFO/CFJ 都采用这种方式。若不使用 CFO/CFJ 方法,可通过对高斯脉冲进行模拟基带滤波,实现对脉冲的整形。

### 1.3.2 定时同步

UWB 物理层面临的主要挑战之一是同步的精度和速度问题。正如 UWB 系统,应用低功耗超短脉冲(脉宽为 ns 量级),很小的失配将导致能量捕获和字符检测失败,因此时间同步将是很严格的。同步方法包括:在没有多径和数据辅助情况下,通过码束序列和相关器组实现同步方法<sup>[33]</sup>;对于测距系统,需要先验已知最强多径的知识<sup>[34]</sup>;利用 TH 序列的循环平稳特性,文献[35]提出密集多径系统非数据辅助(盲)时间估计器;文献[36]利用字符和帧率采样的基于数据辅助最大似然定时算法。

基于“污染模板定时(TDT, Timing with Dirty Templates)”的概念,文献[32、37]提出了 UWB 定时算法。该思想是基于接收信号的字符周期截断相关。当时间同步时,无噪声的信号模板的自相关具有唯一最大值。这一思想,在窄带已经得到应用,比如迟-早门算法。TDT 只能在有数据辅助(DA, Data Aided)情况下应用。

### 1.3.3 RAKE 接收和多径分集<sup>[36,38]</sup>

最常用的 UWB 接收机是相关接收机(匹配滤波),采取接收脉冲序列与发射信号相关。UWB 传输有强的多径分辨能力,这促使人们研究基于相关的并能有效分集的 RAKE 接收机。UWB-RAKE 接收机的研究分为两大类:帧率、字符率 RAKE 接收机(Frame-and symbol-rate Rake receivers)和基于 UWB 信道量化的多径分集。

### 1.3.4 UWB 多用户检测技术

为了从统计意义上进行多用户干扰(MUI, Multiple-User interference)消除,UWB-MA(UWB-Multiple Access UWB,多址通信系统)也利用多用户检测(MUD, Multiple User Detection)技术。事实上,文献[39]建立了第一个 UWB-