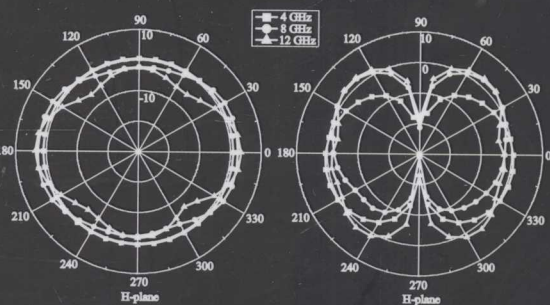


Planar Monopole and Dipole Antennas: Theory and Ultrawideband Applications

# 平面结构的 超宽带振子天线 理论与应用

吴琦 苏东林 金荣洪 【著】  
郭英杰 【审】

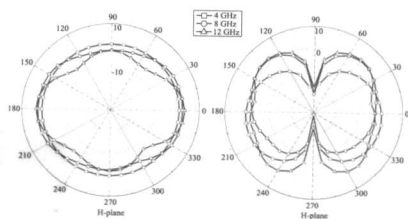


北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

Planar Monopole and Dipole Antennas:  
Theory and Ultrawideband Applications

# 平面结构的 超宽带振子天线 理论与应用

吴琦 苏东林 金荣洪 【著】  
郭英杰 【审】



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内容简介

本书面向超宽带系统应用及发展需求,主要介绍了超宽带振子天线的频域、时域特性,超宽带偶极子天线的电流模型,低剖面超宽带偶极子天线,以及超宽带振子天线的优化。

本书的最大特点有三:其一,将超宽带系统应用需求与超宽带振子天线的理论进展与设计方法相结合;其二,将超宽带振子天线的辐射模型贯穿全书,从机理上阐述天线的阻抗匹配、方向图、脉冲收发、共形安装以及组阵技术;其三,突出全局寻优算法在天线设计中的重要作用,实现与超宽带系统应用的有效连接。

本书可供高等院校学生、系统设计师、天线工程师和各类研究人员参考,也可以作为普通高等院校选修课教材。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

平面结构的超宽带振子天线理论与应用/吴琦,苏东林,金荣洪著. —北京:北京理工大学出版社,2013.11

ISBN 978-7-5640-7916-1

I. ①平… II. ①吴… ②苏… ③金… III. ①平面结构-超宽带天线-偶极天线  
IV. ①TN821

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第159630号



---

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/11.75

字 数/272千字

版 次/2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷

定 价/48.00元

责任编辑/陈莉华

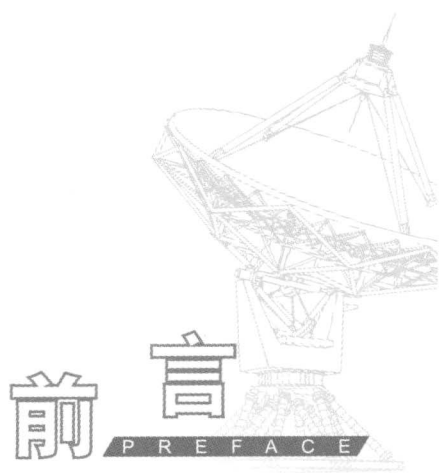
文案编辑/陈子慧

责任校对/周瑞红

责任印制/马振武

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



本书面向超宽带系统的应用及发展需求，主要介绍了平面结构的超宽带振子天线的相关应用领域、平面单极子天线的频域与时域工作特性、平面偶极子天线的近似电流模型与低剖面设计方法，以及平面振子天线的优化方法。本书的特点是：将超宽带系统的应用需求与超宽带平面振子天线的理论进展、设计方法相结合；将超宽带平面振子天线的辐射模型贯穿全书，从机理上阐述天线的阻抗匹配、辐射方向图、脉冲收发、共形安装以及组阵技术。

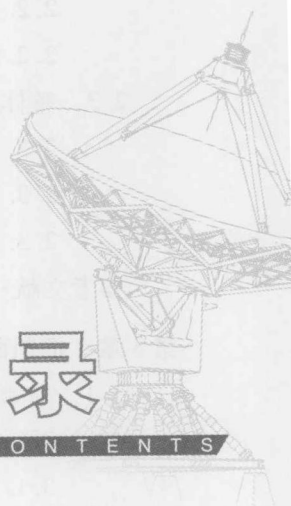
不同于一般的超宽带天线书籍，本书不仅针对超宽带无线通信系统的应用需求，而且较为系统地阐述了常见系统对平面结构的超宽带天线的设计需求，在需求的牵引下提出作者在超宽带平面振子天线领域的最新研究成果，并客观评价了不同需求条件下各类天线方案的优劣。应该说，随着通信技术、电路技术和天线技术的高速发展，不同天线方案的优劣可能发生改变。如果选择使用超宽带平面振子天线的方案，读者可参考第4章至第9章的内容进行方案评估和天线设计。作者意识到未来无线通信系统以及各类用频设备的发展在很大程度上受到系统电磁兼容性的限制，因此我们试图将电磁兼容的观点引入系统性能评估和天线需求分析当中，以期抛砖引玉。

本书可供高等院校学生、系统设计师、天线工程师和各类研究人员参考，也可以作为普通高等院校选修课教材。

在本书的撰写过程中，硕士生王诗然为第7章和第9章提供了部分素材，并为本书第1~3章绘制了部分插图；博士生李冰为第9章提供了部分素材；承蒙澳大利亚联邦科学与工业研究院(CSIRO)信息领域首席科学家郭英杰(Y. Jay Guo)教授担任本书主审，他提出了许多宝贵的修改意见，在此一并表示衷心的感谢。由于撰写时间和作者水平有限，所以本书的不足之处敬请各位读者批评指正。

作者

2013年5月



# 目 录

CONTENTS

第 1 章 超宽带无线通信系统组成与天线需求	001
1.1 超宽带通信技术的发展历程	002
1.1.1 发展历程与技术特点	002
1.1.2 无线传播信道	003
1.2 面向超宽带无线通信系统的天线需求	005
1.2.1 单带超宽带通信系统	006
1.2.2 多带超宽带通信系统	008
1.3 面向认知无线电系统的天线需求	010
1.3.1 系统原理与组成	010
1.3.2 单天线方案	013
1.3.3 双天线方案	015
1.4 面向高速芯片无线互连系统的天线需求	015
1.5 面向系统应用的天线评价标准	018
参考文献	019
第 2 章 大型被试品高频辐射发射与辐射敏感试验方法	023
2.1 绪 论	024
2.1.1 民用认证标准	024
2.1.2 军用测试标准	025



2.2	区域扫描试验方法的局限性	026
2.2.1	区域扫描试验方法	026
2.2.2	测试不确定度分析	028
2.3	整体辐照试验方法	029
2.3.1	整体辐照试验方法	029
2.3.2	超长被试品试验	030
2.3.3	辐射场强分析	031
	参考文献	032
<b>第3章</b>	<b>低剖面超宽带振子天线的系统应用</b>	<b>033</b>
3.1	射频孔径综合系统	034
3.1.1	射频孔径综合系统简介	034
3.1.2	天线综合一体化方法	038
3.1.3	天线综合一体化关键技术	042
3.2	超宽带相控阵系统	043
3.2.1	基本原理	044
3.2.2	系统组成	045
3.2.3	天线单元	047
3.3	电子对抗系统	048
3.3.1	雷达告警系统	048
3.3.2	电子侦察系统	049
3.3.3	电子干扰系统	050
	参考文献	050
<b>第4章</b>	<b>超宽带平面单极子天线的频域特性</b>	<b>053</b>
4.1	基础理论	054
4.1.1	天线分类	054
4.1.2	辐射模型	057
4.1.3	物理极限	058
4.2	阻抗匹配的设计	060
4.2.1	振子设计——叠圆单极子结构	060
4.2.2	接地板设计——接地板刻槽结构	061
4.2.3	馈电结构设计——阻抗变换结构	063
4.3	辐射方向图的设计	067
4.3.1	H面全向覆盖——等宽地方法	067
4.3.2	E面稳定覆盖——梯形地方法	071
4.3.3	信号传输特性——镜像地方法	077

参考文献	081
<b>第5章 超宽带印刷单极子天线的时域特性</b>	087
5.1 介质基片影响	088
5.2 天线结构设计	094
参考文献	101
<b>第6章 超宽带平面偶极子天线的电流模型</b>	103
6.1 电流模型	104
6.2 低剖面安装结构	108
6.3 平面阵列结构	111
参考文献	113
<b>第7章 低剖面超宽带偶极子天线</b>	115
7.1 辐射机理	116
7.1.1 结构组成	116
7.1.2 设计思路	117
7.1.3 本章内容提要	117
7.2 非平面偶极子单元	118
7.2.1 设计建模	118
7.2.2 加工测试	121
7.3 复合栅格反射器	124
7.3.1 H型和E型栅格反射器	125
7.3.2 复合栅格反射器	129
7.4 倒T型匹配结构	134
7.4.1 天线模型	135
7.4.2 整体结构	137
7.4.3 短路枝节影响	141
参考文献	143
<b>第8章 片上多金属互连层组合振子天线</b>	147
8.1 天线结构	148
8.2 片内互连特性	149
8.3 片间互连特性	151
参考文献	157
<b>第9章 超宽带平面振子天线的优化</b>	159
9.1 粒子群算法	160
9.1.1 算法简介	160

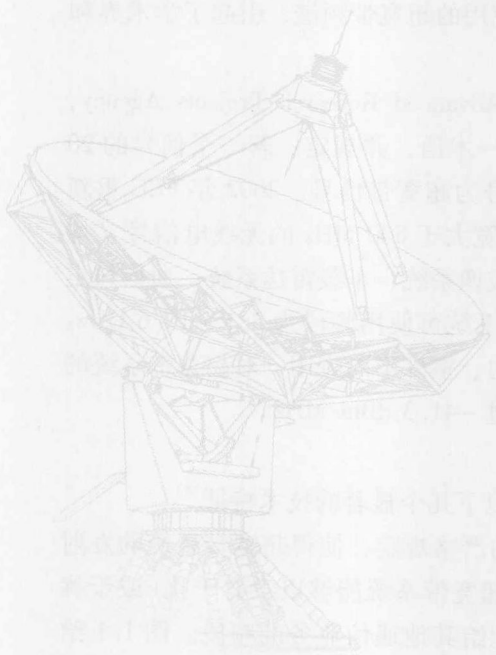




9.1.2	算法参数分析	162
9.1.3	软件接口设计	166
9.1.4	算例	167
9.2	参数化建模	170
9.2.1	参数化模型	170
9.2.2	优化方法	172
9.2.3	结果讨论	175
	参考文献	177
	附录：符号与缩写表	179

# 第1章

## 超宽带无线通信系统 组成与天线需求





## 1.1 超宽带通信技术的发展历程

### 1.1.1 发展历程与技术特点

#### 1. 发展历程

超宽带通信技术最早可追溯到1901年马可尼著名的电报传输试验。当时他利用电火花放电产生的超宽带信号首次实现了长距离电报发送。但是在很长的时间内，超宽带通信技术发展速度十分缓慢，尤其是在超外差式接收机问世以后，窄带通信方式一直占据主流。超宽带通信技术发展速度缓慢的一个重要原因是超宽带器件和超宽带电磁算法的缺失。由于有源器件的性能限制，当时的超宽带收发机电路的处理增益远低于超外差式接收机。天线和微波器件理论大多基于时谐电磁场方法，超宽带滤波器、超宽带天线等无源器件的分析、设计方法也存在很大的不足<sup>[1]</sup>。近年来，随着计算电磁学算法的发展和快速傅立叶变换的出现，时谐电磁场方法已经能够较好地处理超宽带无源器件的仿真预测问题，但设计理论和设计方法还在持续发展之中。

1960年左右，美军率先开始发展超宽带雷达技术和保密通信技术，研究发现超宽带技术具有低系统复杂度、高定位精度、低发射功率以及低可截获性等优点，属于高度机密的军事技术<sup>[2]</sup>。直到2002年，美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）批准了一系列民用超宽带技术，并专门批准了无须执照使用的超宽带频谱，引起了学术界和工业界的高度关注<sup>[3]</sup>。

1989年，美国国防部高等研究计划局（Defence Advanced Research Projects Agency, DARPA）首先采用超宽带（Ultra Wide Band, UWB）这一术语，并规定：若一个信号的20 dB带宽大于1.5 GHz或相对带宽大于25%，则称该信号为超宽带信号。2002年FCC重新定义了超宽带信号，即信号相对带宽大于20%或绝对带宽大于500 MHz的无线电信号（均为10 dB带宽），并给出了超宽带系统的具体应用，分为成像系统、车载雷达系统、通信与定位系统三大类。根据FCC Part15文件规定，超宽带通信系统可使用频段为3.1~10.6 GHz。为保护现有无线系统不被超宽带通信系统干扰，针对室内、室外不同应用，对超宽带系统的辐射谱密度进行了严格限制，即最高辐射谱密度不得超过 $-41.3 \text{ dBm/MHz}$ <sup>[4]</sup>。

#### 2. 技术特点

与传统的窄带通信技术相比，超宽带通信技术具有以下几个显著的技术特征<sup>[5]</sup>：

(1) 频谱复用能力强。FCC对超宽带系统发射功率的严格规定，使得超宽带系统的发射频谱相对于窄带系统而言类似于噪声。因此，理论上讲超宽带系统能够以没有干扰（或干扰极小）的方式与当前其他无线业务共存，即共享已经分配给其他通信业务的频段。图1.1给出了FCC规定的3.1~10.6 GHz的频谱复用情况。

(2) 超高传输速率。依据无线数据传输的香农定理，通信系统的信道容量正比于系统带宽，因此超宽带通信系统具有超高的信道容量。理论上，超宽带通信系统最多可以使用

7.5 GHz的物理带宽，可以支撑 Gbps 级别的信号传输。受限于系统的发射功率，上述超高传输速率仅能在很短的通信距离中达到（10 m 量级）。除了超高传输速率外，超宽带通信系统在空间容量上也有着巨大的优势。依据 Intel 公司的研究结果，超宽带通信系统的空间容量每平方米可达 1 Mbps，远高于无线局域网（WLAN）、蓝牙（Bluetooth）等窄带系统的空间容量（通常在每平方米几十 kbps 左右）。

(3) 低系统复杂度。对于直接脉冲调制体制的超宽带通信系统，由于信号的调制解调过程中无须载波，简化了传统超外差式接收机中的本振和混频器等元器件，在低发射功率条件下甚至无须功率放大器。而这些射频组件在通信系统中属于价格相对昂贵、能量消耗相对高的器件，因此，超宽带系统的构造成本和功率消耗也相对更低。

(4) 抗多径传输能力强。多径衰落信道是移动通信面临的基本问题之一，来源于无线信号经过不同传输路径后叠加而成的接收信号强度随时间和空间分布的随机波动。多径衰落对于窄带通信系统性能存在着较大影响，视距和非视距传输的连续波信号可能反相抵消，在某些情况下会导致信号强度的急剧衰减。超宽带通信系统由于可以直接传输纳秒级的窄脉冲，反射波持续的时间非常短，与视距传播脉冲在时间上重叠的概率很小，从而具有很强的抗多径传输能力。

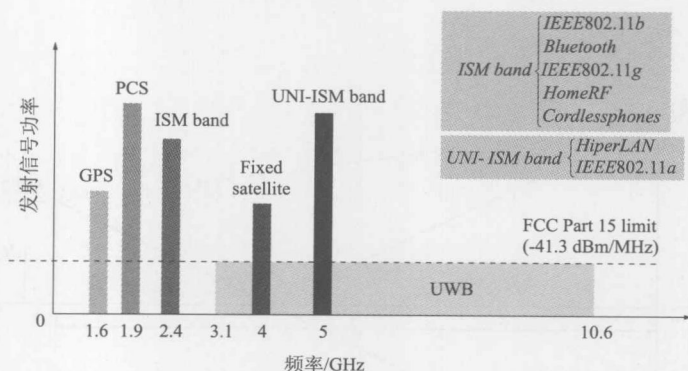


图 1.1 超宽带系统工作频带与窄带无线系统共存情况

## 1.1.2 无线传播信道

### 1. 自由空间传播

在自由空间中，超宽带信号以电磁波辐射的形式向三维空间传播。在远离发射天线的区域，信号传播等相位面呈现出以天线为球心的球面形状。假设天线为无方向性的理想点源，则在距离天线  $d$  的球面上信号能量密度是均匀的。即信号能量密度的传播与频率无关，与  $1/(4\pi d^2)$  成正比。

若接收天线是单位增益的理想天线，则天线的有效口径  $A_e = \lambda^2/(4\pi)$ ，依据无线电波的 Friis 传输方程，可以得到自由空间中信号传输的路径损耗

$$P_L = 20 \log \left( \frac{c}{4\pi df} \right) \quad (1.1)$$

可以看出，自由空间中信号传输的路径损耗与信号频率相关，这主要是因为单位增益天

线的有效口径与频率相关。若想得到与频率无关的恒定路径损耗，天线需要具备与频率无关的有效口径，例如采用与非频变天线（Frequency Independence Antenna）类似的工作方式。

## 2. 地面反射传播

假设收发天线架高在理想地面上方，天线高度分别为  $H_1$  和  $H_2$ ，天线间距为  $d$ ，如图 1.2 所示，则通过直射信道的传播路径

$$D = \sqrt{d^2 + (H_1 - H_2)^2} \quad (1.2)$$

则通过地面反射的传播路径

$$R = \sqrt{d^2 + (H_1 + H_2)^2} \quad (1.3)$$

两条传播路径间的时延为

$$\Delta t = \frac{R - D}{c} \quad (1.4)$$

由于脉冲信号是瞬态现象，只在短暂的时间内出现，当直射信号和反射信号在接收机端合成时，形成两个短脉冲。若直射路径和反射路径的时延大于脉冲信号的时间宽度，两个脉冲信号在时间上完全分开，则通过直射路径的脉冲信号可以被准确地接收。当上述条件不能得到满足时，两个脉冲信号将在局部重叠，可能造成信号的误判。

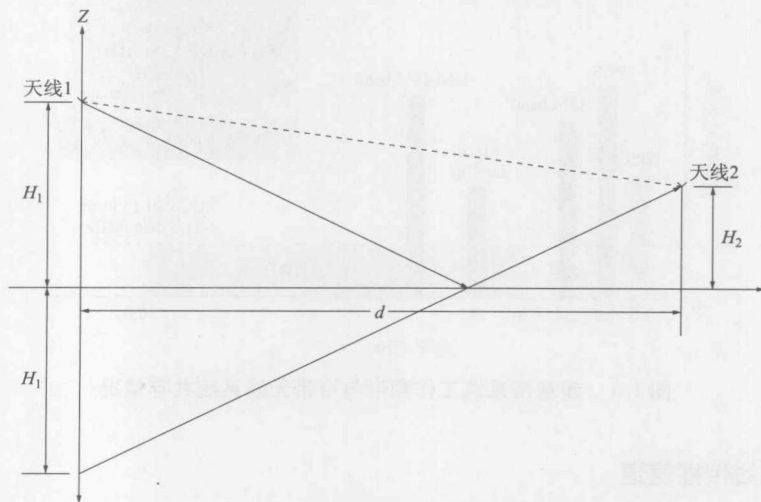


图 1.2 地面反射传播状态示意

## 3. 多径环境传播

室内通信环境中信号传播会遇上墙壁、家具等障碍物，存在着大量的电磁波反射、散射和绕射，形成许多条不同的传播路径。虽然超宽带脉冲信号持续时间极短，但多条路径传输的脉冲信号仍极可能混叠在一起。理想情况下，直射路径传输的脉冲幅度较高，其他路径传输的信号存在一定的损耗且混叠在一起，但直射路径传输的脉冲信号与其他路径传输的信号在时间分布上存在着一个保护带。这种情况下还能区分主信号，如图 1.3 所示。

多径环境传播特性可以用信道脉冲响应（Channel Impulse Response, CIR）来描述<sup>[6]</sup>。假设发射一个理想脉冲信号  $\delta(t)$ ，接收信号是多个脉冲信号的线性叠加

$$s(t) = \sum a_n \delta(t - \tau_n) \quad (1.5)$$

其中,第 $n$ 条传输路径的时间延迟为 $\tau_n$ ,经过传输后信号幅值为 $a_n$ ,信号能量用 $r_n$ 表示。多径环境传输条件下信道特性可以用延迟扩展系数 $\tau_{\text{RMS}}$ 表示,其定义是能量加权的信号延迟的均方根误差。可通过下式计算

$$\tau_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum r_n \tau_n^2}{\sum r_n} - \left[ \frac{\sum r \tau_n}{\sum r_n} \right]^2} \quad (1.6)$$

在各种复杂的多径环境中,比如写字楼内传播时,脉冲信号可以经墙壁或障碍物表面反射或者穿过墙壁和障碍物继续传播,引起的能量延迟趋向于指数分布,可以看成多径脉冲信号在离散时间 $\tau_n = nt_0$ 时抵达接收端。其中,单位延迟时间 $t_0 = 1/B$ , $B$ 是信道的可分辨带宽,与信号带宽相仿。

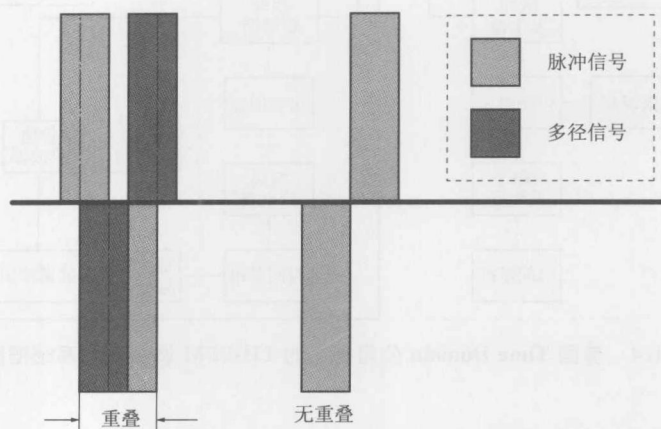


图 1.3 脉冲信号在多径传播过程中的信号重叠现象

## 1.2 面向超宽带无线通信系统的天线需求

超宽带无线通信技术根据底层超宽带信号的实现形式不同,可分为两大类。一类是基于窄脉冲式超宽带系统,即脉冲辐射超宽带方案(Impulse Radiation-UWB, IR-UWB),也称单带超宽带系统。单带超宽带通信系统取消了传统超外差式通信系统的载波调制,直接对窄脉冲信号进行调制,具有频谱利用率高、能量效率高、抗多径衰落能力强的优势,还可用于高精度的定位系统。但该方式频谱共享的灵活性较差,容易对其他窄带系统产生干扰。另一类是基于调制载波扩频式的载波类超宽带系统,称为多带超宽带系统。它采用正交频分复用技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)传输子带信息,提高了频谱的灵活性,但易造成较高的峰均功率比,使得功率放大器和收发机的整体效率很难提高。

超宽带通信技术在短距离(10 m左右)上的高传输速率使其一度成为无线个体局域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)标准 IEEE 802.15.3a 以及低速网络 IEEE 802.15.4a 的候选方案。工业界出于技术能力储备和自身商业利益的考虑,为此提出了不同

的标准。遗憾的是各方并没有达成共识，也没有形成行业标准或规范，无法很好地推动超宽带通信技术的工业化和市场化。

### 1.2.1 单带超宽带通信系统

单带超宽带通信系统，由摩托罗拉（Motorola）、Xtreme Spectrum 等公司主推，采用脉冲辐射超宽带思想。具体方案是采用脉冲幅度调制（Pulse Amplitude Modulation, PAM）、脉冲位置调制（Pulse Position Modulation, PPM）或脉冲极性调制方法（Bi-Phase Modulation, BPM）将信息调制到一系列窄脉冲中，采用码分或跳时的多址方式进行多用户信道共享。图 1.4 为美国时域（Time Domain）公司提出的跳时脉冲位置（TH-PPM）调制的超宽带通信方案<sup>[7]</sup>。

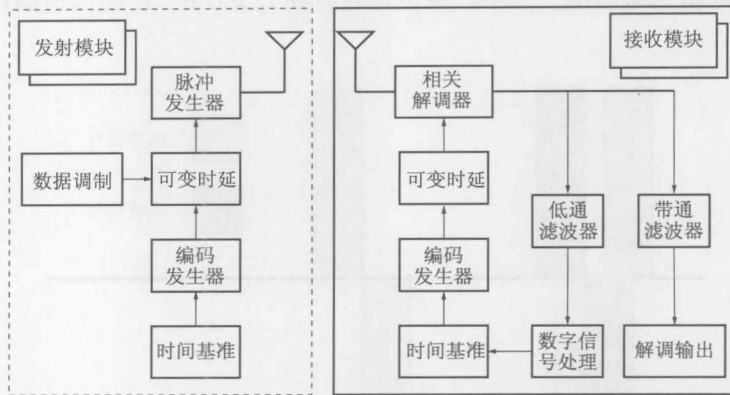


图 1.4 美国 Time Domain 公司提出的 TH-PPM 调制方式系统框图

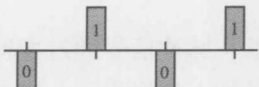
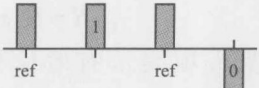
#### 1. 调制方式

单带超宽带通信系统的信号调制方式较为特殊，不采用载波调制而是将信息直接调制在窄脉冲的信息中，例如脉冲的幅度、位置或极性。表 1.1 中给出了典型脉冲调制方式的数学表达式及脉冲波形。在表 1.1 中，脉冲发射周期为  $T$ ，基础窄脉冲信号为  $P(t)$ 。第  $m$  个比特信号用  $b_m$  表示，取值范围在 0 到 1 之间。为减小信号之间的串扰，基础窄脉冲信号的持续时间应该远小于脉冲发射周期。

表 1.1 典型脉冲调制方式

脉冲调制方式	数学表达式	脉冲波形
开关键控调制 (OOK)	$s(t) = \sum_m b_m \cdot P(t - mT)$	
脉冲幅度调制 (PAM)	$s(t) = \sum_m A_{b,m} \cdot P(t - mT)$	
脉冲位置调制 (PPM)	$s(t) = \sum_m P(t - mT - b_m \delta)$	

续表

脉冲调制方式	数学表达式	脉冲波形
双极性调制 (BPM)	$s(t) = \sum_m b_m P(t - mT)$	
发射参考调制 (TRM)	$s(t) = \sum_m P(t - (m - 1)T) + \sum_m (2b_m - 1)P(t - (m - 1)T - D)$	

开关控制调制是最简单的脉冲调制方式,通过简单的开关操作即可实现信号调制,即在比特信号为1时打开开关,发射一个脉冲信号,其他时间不发射任何信号。尽管系统结构简单、功耗极低,但系统对脉冲干扰极为敏感,长串的零信号也不利于系统同步。

脉冲幅度调制通过脉冲信号的幅度信息来表示比特信息,例如将高电平信号表示为“1”而低电平信号表示为“0”。在衰减信道的条件下,低电平信号可能淹没在噪声中,使脉冲幅度调制的实际信号与开关控制调制方式类似。从信号频率域分布来看,严格的周期脉冲发射将在脉冲频率 $f=1/T$ 的倍频上形成较强的离散谱,在这些局部频点发射信号的功率密度可能超过 FCC 规定的极限值。

脉冲位置调制将比特信息调制在脉冲与参考脉冲的相对时间位置中,例如使用在时间周期上出现的脉冲信号表示为“1”,而使用在时间周期上提前出现的脉冲信号表示为“0”。脉冲位置调制中信号具有同样的幅度,因此系统具有更好的抗噪声能力;但是系统容易受多径传输产生的各种延时信号干扰,对时间同步要求也很高。

双极性调制将比特信息调制在不同极性的脉冲信号中,例如用正信号表示为“1”,用负信号表示为“0”。该调制方式具有抗噪声能力强、具有光滑连续频域谱线的优点,但系统复杂度较高,对时间同步要求也较高。

发射参考调制在发射任意数据脉冲信号前均增加一个参考脉冲信号,用于解决时间同步和多径传输的问题。当数据脉冲信号的极性与参考脉冲信号相同时表示为“1”,极性相反时表示为“0”。由于使用两个脉冲信号表达一个比特信息,发射参考调制的效率比其他方式要低一半。

## 2. 解调方式

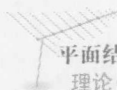
超宽带脉冲信号的解调主要有两种方式:一种是非相关解调,通常采用能量检测方式;另一种是相关解调,通常采用匹配滤波器方式。能量检测方式通过检测信号的能量并与门限值比较,判断接收到的信号比特。系统的构成相对简单,由平方器、有限积分器和门限判决器级联而成。

可以证明白噪声条件下匹配滤波器是最优接收方式。匹配滤波器通过接收电路产生一个理想信号 $s(t)$ ,并与实际接收到的信号 $r(t)$ 进行卷积,恢复出信号比特,如下式

$$R(\tau) = \int s(t) r(t - \tau) dt \quad (1.7)$$

式中,通过改变时延 $\tau$ 的大小使信号相关系数最大。





在多用户条件下, 实际接收的信号由当前用户信号  $s_1(t)$ 、其他用户信号  $s_2(t)$  和噪声信号  $w(t)$  组成, 即

$$r(t) = \bar{s}_1(t) + \bar{s}_2(t) + w(t) \quad (1.8)$$

需要注意, 脉冲信号通过发射天线的辐射和接收天线的接收后可能产生一定的失真, 真实的接收信号加上划线表示, 即  $\bar{s}_i(t)$ 。多用户条件下实际接收信号经过匹配滤波器解调可得

$$R = R(s_1, r) = R(s_1, \bar{s}_1) + R(s_1, \bar{s}_2) + R(s_1, w) \quad (1.9)$$

式中, 第一项表示有效信号能量; 第二项表示多址干扰项 (Multi-Access Interference, MAI); 第三项表示信号与高斯白噪声的相关项, 通常可以忽略。

### 3. 天线需求

超宽带无线通信系统的天线设计, 基本要求是天线的阻抗带宽能够满足系统工作带宽的要求, 也就是能够覆盖系统使用的脉冲信号带宽; 天线应具有较小的尺寸、较高的辐射效率, 满足电磁信号有效辐射的要求; 天线具有近似全向的辐射方向图, 满足电磁信号的覆盖要求。这些基本要求属于超宽带天线的频域特性, 具体天线的分析和设计方法可见本书第4章的相关内容。应注意虽然超宽带天线的具体实现方法存在较大革新, 但传统的窄带指标仿真、测试和设计方法大多仍可沿用。

超宽带天线设计中, 还需要满足发送和接收这些时域脉冲时不产生失真或仅产生极轻微失真的要求。这个要求的分析可以从两方面展开。首先参考式 1.9, 相关解调恢复信号所需要的信号能量项是系统采用的理想脉冲信号  $s(t)$  与经过天线收发后的失真脉冲信号  $\bar{s}(t)$  的相关性系数。若天线收发信号失真太大, 则信号能量项将变得很小, 系统性能也将明显降低。在本书第5章中, 我们证明了该相关性系数是超宽带天线脉冲辐射保真系数的平方, 同时介绍了一套超宽带印刷单极子天线的脉冲收发特性优化设计方法。

另一方面, 可以从系统接收脉冲信号交叠现象入手进行讨论。由脉冲调制方式的分析中可以看出, 超宽带系统的传输速率与脉冲重复周期直接相关。假设系统脉冲重复周期为  $T$ , 脉冲信号宽度为  $\tau$ , 脉冲重复周期应远大于脉冲信号宽度。对于脉冲幅度调制、脉冲位置调制等调制方式, 系统传输速率理论上为  $1/T$ bps; 对于发射参考调制方式, 系统传输速率理论上为  $1/(2T)$ bps。要达到 1 Gbps (或 500 Mbps) 的传输速率, 采用发射参考调制的系统脉冲重复周期应该小于 0.5 ns (或 1 ns)。考虑到脉冲信号宽度通常在 0.5 ns 左右, 若超宽带天线在收发脉冲信号时产生脉冲宽度扩展现象, 则在 1 Gbps 传输率条件下脉冲信号将产生明显交叠, 产生严重的码间串扰。若采用 500 Mbps 的传输速率, 理论上允许天线收发脉冲信号时产生小于 0.5 ns 的脉冲宽度扩展。因此, 要提高系统传输速率, 必须控制超宽带天线收发脉冲信号时产生的脉冲宽度扩展。在第5章中, 我们将介绍超宽带印刷单极子天线收发脉冲信号时脉冲宽度扩展的产生机理和控制方法。

#### 1.2.2 多带超宽带通信系统

多带超宽带技术, 由 Intel、TI 等公司主推, 将可用的超宽带频谱 (3.1 ~ 10.6 GHz) 分为一组带宽大于 500 MHz 的子频带, 子频带内可以采用灵活的信号调制方式。通常采用正交频分复用 (OFDM) 技术进行信号调制, 考虑到硬件成本的限制, 通常选用 3.1 ~ 5.1 GHz