

分 类 号: TN91
研究生学号: 2008512038

单位代码: 10183
密 级: 公 开



吉 林 大 学

硕士学位论文

压缩传感在超宽带通信中的应用研究

Study of Compressive Sensing Based
Ultra-wideband Communication

作者姓名: 王蜀南

专 业: 电路与系统

研究方向: 数字通信

指导教师: 郭树旭 教授

培养单位: 电子科学与工程学院

2010 年 5 月

压缩传感在超宽带通信中的应用研究

Study of Compressive Sensing Based
Ultra-wideband Communication

作者姓名：王蜀南

专业名称：电路与系统

指导教师：郭树旭 教授

学位类别：工学硕士

答辩日期：2010 年 6 月 3 日

未经本论文作者的书面授权，依法收存和保管本论文书面版本、电子版本的任何单位和个人，均不得对本论文的全部或部分内容进行任何形式的复制、修改、发行、出租、改编等有碍作者著作权的商业性使用（但纯学术性使用不在此限）。否则，应承担侵权的法律责任。

吉林大学博士(或硕士)学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：王蜀南

日期：2010 年 6 月 3 日

提 要

本文研究了压缩传感在超宽带通信中的应用,提出一种基于压缩传感理论框架下的超宽带实现方式。为解决超宽带的高频带和高带宽带来的数模转换和器件方面技术瓶颈提供了一条良好的解决途径。根据 D.Donoho 等人提出的压缩采样理论,采用对信号端进行稀疏控制的方式满足信号稀疏性,利用压缩传感框架进行超宽带通信。本文中超宽带信号使用的是基带信号,在信号端采用高斯脉冲波形脉冲位置 (PPM) 调制方式,控制脉冲个数使信号具有稀疏性,然后通过随机滤波器之后发送出去,在接收端直接采用只有 Nyquist 频率的 10%以下的速率直接采样,得到的数据利用正交匹配追踪算法还原出原始的信号。本文在 Matlab 中对该过程进行了模拟,成功实现用低于 Nyquist 频率的 10%以下的速率采样得到的数据完好还原原始信息。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题的提出	1
1.2 研究的背景、目标及意义	1
1.2.1 课题研究的背景	1
1.2.2 课题研究的目标及意义	2
1.3 所做的主要工作及论文组织结构	3
第二章 压缩传感理论和超宽带技术	4
2.1 压缩传感理论	4
2.1.1 概述	4
2.1.2 数学原理	5
2.1.3 主要内容	7
2.1.4 应用	11
2.2 超宽带技术	12
2.2.1 超宽带无线电的定义	13
2.2.2 超宽带信号的产生和传播	15
2.2.3 超宽带技术的优点及面临的问题	20
第三章 压缩传感在超宽带通信中的应用	22
3.1 压缩传感应用在超宽带中的原理	22
3.1.1 随机滤波方法	22
3.1.2 编码方式	23
3.1.3 信号恢复算法	25
3.2 应用系统的模型	25
第四章 实验过程、结果及分析	28
4.1 实验过程	28
4.2 实验结果	29
4.2.1 随机滤波器的实验结果	29
4.2.2 实验滤波器长度	30
4.3 实验数据分析	31
第五章 结束语	33
参考文献	34
致 谢	36
摘 要	
ABSTRACT	

第一章 绪论

1.1 课题的提出

了解一些通信、信息处理知识的人都知道香农/奈奎斯特 (Shannon/Nyquist) 采样定理, 为不失真的还原原始信号, 采样频率至少要是信号带宽两倍。这也是统治了信息处理领域长达多年的基本准则之一。为此专业科研和技术的发展起到了非常重要的指导作用。随着科学技术水平的发展进步, 需求的日益增加, 人们开始向更高的频率迈进。要处理的信号带宽越来越大, 而同时所需的高频率处理转换技术工艺水平极大的制约了高带宽的发展。

2004 年 D.Donoho 和 Candès 等人提出了压缩传感或压缩采样 (Compressive Sensing or Compressive Sampling, 此后简称 CS) 理论^[1]。他依据的是自然信号对于某种基一般都具有稀疏性, 将原始信号用这种基表达后, 使其具有稀疏的特点, 这时再采样就不必再用高于信号带宽两倍的速率进行采样了。实际上为了保证信号采集的完整性, 在应用中往往要把采样率提高到信号带宽的 5~10 倍。如此一来 CS 理论对于采样理论的突破就更加显得意义非同一般了。

近些年来, 超宽带 (Ultra Wide Band, 此后简称 UWB) 技术。凭借它远优于传统传输技术的巨大优点, 在各个方面引起了热切的关注。但是此项技术对于数模转换器件的要求非常高。现有工艺技术水平大大的制约了它的发展。

CS 理论的提出为解决这个矛盾指明了一条很好的研究方向。依据 CS 理论只要根据信号的稀疏性, 我们就可以在接收端使用甚至远低于信号带宽的采样速率来采集信号, 然后在使用特定的恢复算法来还原原始信号。这样一来就大大的缓解了高带宽或者超高带宽对于数模转换器件的依赖, 为超宽带技术的发展解决了一个难题。

本文就依据此情况将 CS 理论应用在超宽带通信方面进行研究, 寻找一种较好的结合途径。

1.2 研究的背景、目标及意义

1.2.1 课题研究的背景

随着现代科学技术的进步, 传感系统不断发展, 获取数据的能力不断地增强,

需要处理的数据量也不断增大。通信方面所利用的电磁频谱不断的向高频处前进，而传统的 Nyquist 采样定理要求信号的采样率至少要高于信号带宽的 2 倍。这样一来对信号处理的能力提出了更高的要求，同时也给相应的硬件设备带来了极大的挑战。寻找新的数据采集与处理方法就成为了迫在眉睫的问题。2004 年出现的压缩传感理论，它充分的利用了大量自然信号所具有的稀疏性或可压缩性的特性，展现出了一种集信号采集和编码压缩为一体的全新的方法。该理论表明，当信号具有稀疏性或可压缩性时，不用先对信号利用高速率进行采集，再进行压缩。可以将采集和压缩两个步骤合为一体同时进行，直接通过采集少量的信号投影值就可实现信号的准确或近似重构。这样既减小了对高速器件的要求又同时节约了大量的存储资源，优点明显。

超宽带通信是通俗的讲就是指其传输信号所占的带宽相对于其所属中心频率来说比较大。不太同于传统的无线电信号。最早在 20 世纪 90 年代由美国军方提出，随着技术的发展，逐渐的在民用多个方面得到了广泛的应用。由于它的大带宽带来了许多应用方面的优点，因此 UWB 可以应用在很多领域，如超宽带通讯、数据通信、无线传感网、无线定位、成像应用等等。

UWB 技术优点突出的同时也带来了很多技术方面的难题。仅仅是信号的高带宽本身就带了数模转换的很大的问题。越高的信号带宽就需要高速的转换器件，但是由于工艺水平的限制，现阶段高速率的数模模数转换或者成本太高无法广泛应用，或者干脆就无法技术实现。这就大大的制约了 UWB 技术的发展。CS 理论的出现给解决这个问题提供了一个低成本、高效的解决方法。由此一来研究将 CS 理论应用在 UWB 中就是一个非常重要的课题了。利用 CS 理论采集和压缩同时进行的优点，避开了高速采样芯片的需求，可以直接绕过了 UWB 面临的一个大问题。

1.2.2 课题研究的目标及意义

CS 理论突破了 Nyquist 采样定理的限制，不用将采样速率提高到信号带宽的两倍及以上。这个优点对于通信系统来说正是它最需要的。解析 UWB 通信原理分析信号调制方式，找到两者结合方法，利用 CS 理论低采样率优点缓解 UWB 系统对于高速率采样对器件的迫切需求，实现低速率采样高速 UWB 信号，同时保证能够以高概率完整恢复原始信号。

CS 理论的诞生为低速率采样的可能性提供了理论基础，恰好为超宽带的高频带和高带宽带来的数模转换和器件方面技术瓶颈提供了一条良好的解决途径。如果能将两者结合起来，既能极大的拓宽 CS 理论的应用领域，为该理论给予实践基础，提升该理论本身的价值；同时对于突破 UWB 的技术瓶颈，促进其广泛发展提供了更为良好的发展机会。为给大家尽快提供大量高性能低成本的通信产品成为可能。所以该课题研究的价值意义重大。

1.3 所做的主要工作及论文组织结构

本文主要是研究压缩传感在超宽带通信中的应用。首先介绍了此课题产生的背景和其巨大的研究价值，然后讲述了压缩传感理论和超宽带技术，阐述了两者的结合的可能性，给出了具体的结合的模型和方法，用 Matlab 对模型进行了仿真实验，分析实现结果给出结论。最后对此课题的发展趋势进行了展望。

论文分为以下五个章节：

第一章，绪论。此章主要介绍了 CS 理论的产生、其主要特点，UWB 技术的所面临的问题，两者结合的必要性和意义。阐述了本课题产生的背景，所要达到的目标和意义。列出了本论文的主要研究内容和组织结构。

第二章，压缩传感理论和超宽带技术。此章分别介绍了压缩传感理论的产生、意义和特点，它的数学原理、主要内容、研究现状和面临的主要问题。然后又介绍了超宽带技术，同样阐述了它的定义，主要技术内容和面临的问题。

第三章，压缩传感在超宽带通信中的应用。此章主要讲述了如何将压缩传感理论应用在超宽带通信中。根据两者的特点，详细的叙述了利用随机滤波的方法在超宽带通信中实现压缩传感来避免高速采样的问题。列举了实现的模型。

第四章，实验过程、结果及分析。此章介绍了具体实现方法和步骤。用 Matlab 软件进行了模拟给出了实验数据，对数据进行了分析，给出结论。

第五章，结束语。此章对本课题所做的研究工作进行了总结，指出了有待进一步解决的工作和技术问题，对此研究工作的发展趋势、以后的工作方向进行了展望。

第二章 压缩传感理论和超宽带技术

2.1 压缩传感理论

用传统的方法来采集信号或图像时需要遵循著名的 Shannon 采样定理: 采样速率必须至少两倍于目前最高频率的信号 (即所谓的奈奎斯特速率)。事实上, 这一原则是几乎所有的信号采集中必须遵循的原则, 例如消费电子产品, 医疗成像设备, 无线电接收器, 等等。在数据转换领域, 例如, 标准的模拟数字转换器 (ADC) 技术实现量化时通常依照香农定理: 信号均匀采样频率必须是, 或者高于奈奎斯特速率。

2.1.1 概述

这里介绍的理论被称为压缩传感或简称为 CS 理论, 一种用于获取数据的新型传感/采样模式。依据 CS 理论上说, 我们可以从相对于传统的方法来说少得多采样样本或片段中, 恢复某一特定信号。为了使这成为可能, 压缩传感必须满足两个原则, 即稀疏性和非相关性。

稀疏性: 既是连续时间信号的信息率要远小于信号带宽, 对于离散时间信号来说就是其自由度要远小于其信号长度。更确切地说, CS 理论就是利用了许多自然信号相对于某些特定的基都是稀疏、或者说是可压缩的这个特性。

非相关性: 这种特性是表现在时间与频率的二元性中, 就像在时域中稀疏的 Dirac 函数转换到就延伸全了整个频域。这里表明如果信号在 Ψ 域中具有稀疏表示的话, 那么在采样域必须要散布开。换句话说就是无论怎样, 采样波形都会在 Ψ 域有着及其敏感的表达。

重要的发现是, 人们可以设计一种高效率的检测或抽样协议, 将稀疏信号中的有用的信息, 通过非常少的一组数据捕捉到。这些协议是非适应性的、简单的获取相应的信号, 通过少量的与基不相关的固定波形来提供一种信号的简洁表达。更进一步的说, 这是以一种数字优化的方式通过少量的测量得到的数据而还原完整的原始信号的方法。换句话说, CS 理论就是一种简单而高效的采样协议, 他是可以以低速率对原始信号进行采样, 随后再使用计算能力利用不完整的采样集合来重建完整的原始信号。

传感采样问题

$$y_k = \langle f, \psi_k \rangle, \quad k=1, \dots, m \quad (2.1)$$

这里我们讨论一种获取信号的线性表达传感采样技术。这就是简单的根据与波形 $\psi_k(t)$ 的相关性来表达信号。这是标准的设置。如果检测波形是 Dirac 函数, 那么 y 就是信号 f 的时域或者频域采样值矢量。如果检测波形是像素的指针函数, 一般的来说 y 就是数码相机传感器获得的图像数据。最后如果检测波形是 sin 函数, 那么 y 就是傅里叶系数矢量, 核磁共振图像就是这样, 其他的例子还有很多就不再累述。

尽管 CS 理论可以延伸到连续时域或者空域信号, 但是这里讲述的还是主要限制在离散信号里 $f \in R^n$ 。有两个基本原因: 第一, 概念更简单; 第二这种设定下 CS 理论可以研究的更深入。就像以前说得那样我们对下采样非常感兴趣, 就是对于一个 n 维信号 f , 通过远小于 n 的 m 个测量单元来表示。这种情况出现的非常多。例如, 传感器的数量受到限制, 或者利用中子束成像的测量单元非常昂贵, 又或者成像过程及其缓慢而只能测量很少的次数的核磁共振等等。

这些情况就产生了非常重要的问题。仅仅用 M ($M \ll N$) 个测量单元来准确恢复原始信号是否有可能。设计一种检测波形仅仅用 M 个波形就捕捉到几乎原始信号 f 的所有信息是否可能。怎样来逼近信号 f 都是需要解决的问题。解决这些问题需要解未定线性系统方程。尽管这种说法听起来相当的无法让人信服, 但实际上是可行的。

2.1.2 数学原理

取 R^n 空间中的任意信号 s , 对与某一特定的正交基 $\{\psi_i\}_{i=1}^N$ 总会存在比较稀疏的表达。将此信号表示成该正交基的线性组合。方法是将此正交基对信号 x 进行一种线性测量, 对 x 和此正交基对应的特定向量 $\{\psi_i\}_{i=1}^N$ 做内积, 得到原始信号的稀疏表达 x

$$x = \langle s, \psi_i \rangle \quad i=1, \dots, N \quad (2.2)$$

或者

$$x = \sum_{i=1}^N s_i \psi_i = \Psi s \quad (2.3)$$

将得到的稀疏表达再与观测矩阵 Φ 做矩阵乘法，得到的 M 维的向量 y 。观测矩阵 Φ 是 $M \times N$ 阶矩阵。这样就得到了观测后的数据 y ，只有 M 个远小于原始信号 s 的长度 N 。

$$y_j = \langle x, \phi_j \rangle, \quad j=1, \dots, M. \quad (2.4)$$

整个过程如下所示：

$$y = \Phi x = \Phi \Psi s = \Theta s \quad (2.5)$$

其中 $\Theta = \Phi \cdot \Psi$ 是 $M \times N$ 矩阵。

给定出在 \mathbb{R}^n 空间下的一对正交基 (Φ, Ψ) ，第一个基 Φ 就是用来观测系数表达后的信号 x ，第二个基 Ψ 是用来对信号 s 进行稀疏表达的。这两个基没有必要完全正交，但要满足一定的条件，两个基必须要足够不相关。定义

$$\mu(\Phi, \Psi) = \sqrt{n} \cdot \max_{1 \leq k, j \leq n} |\langle \phi_k, \psi_j \rangle| \quad (2.6)$$

函数 $\mu(\Phi, \Psi) \in [1, \sqrt{n}]$ 表述出了两个基的相关性，只有选取的两个基的不相关度足够大，才能高概率的重建原始信号。

采样所得的观测量 M 远远小于信号的维数 N 。通过观测数 M 来求解 x 或者原始信号 s 是一个病态问题。即方程个数只有 M 个，而未知数则有 N 个。正常情况下这是无法得到确定解的。但是由于原始信号本身的特点具有稀疏性即 Θ 具有 K 项稀疏性。而 K 又小于方程个数 M ，需要求解的未知数就从 N 个减小到了远远小于 N 的 K 个，这样一来求解出原始信号就存在了可能性。也就是说仅仅从远小于 N 的 M 个测量采样就可以高概率的重建原始信号是可能的。这也就是 CS 理论的核心思想。对此，有限等距性质(Restricted Isometry Property ,RIP) 给出了存在确定解的充要条件。就这个观测矩阵一定要把这 K 个稀疏稀疏将为均匀分散开，只有这样在投影到 M 个测量单元的时候才能保证其独立性，如果有任意两个稀疏的值投影在了一起这样就不可能完整的重建原始信号了。测量单元 M 的数量也要满足一定的条件：

$$M \geq C \cdot \mu^2(\Phi, \Psi) \cdot S \cdot \log n \quad (2.7)$$

式 2.5 中的矩阵 Θ 满足 RIP 准则时，通过式 2.4 的逆运算就能求出稀疏标到后的原始信号 x 了。然后再由得到的稀疏系数 x ，就很容易求出原始信号 s 了。但求解 x 的过程相对来说比较麻烦，是应该通过 l_0 范数下求解式 2.5 的最优化问

题

$$\min_s \|s\|_{l_0} \quad s.t. \quad y = \Phi \Psi s \quad (2.8)$$

从而得到稀疏系数的估计。该问题的求解是个 NP-hard 问题，数值解不稳定，这种优化问题几乎没有合适的办法求解。文献^[2]表明，可以用 l_1 最小范数来进行求解，可得到相同的解。因为在一定条件下它和 l_0 最小范数具有等价性。这样就把 l_0 范数的优化问题转换成了 l_1 范数优化，如下式：

$$\min_s \|s\|_{l_1} \quad s.t. \quad y = \Phi \Psi s \quad (2.9)$$

l_1 最小范数下最优化问题又称为基追踪（BP）。

2.1.3 主要内容

CS 理论相对于传统的采样方法有两个方面的突破：一个是它突破了传统的采样定律，大大的降低了采样速率；还有就是编码的方式也起了颠覆性的改变，将传统的采样和压缩两个过程合二为一。传统的采样编码方式见图 2.1。

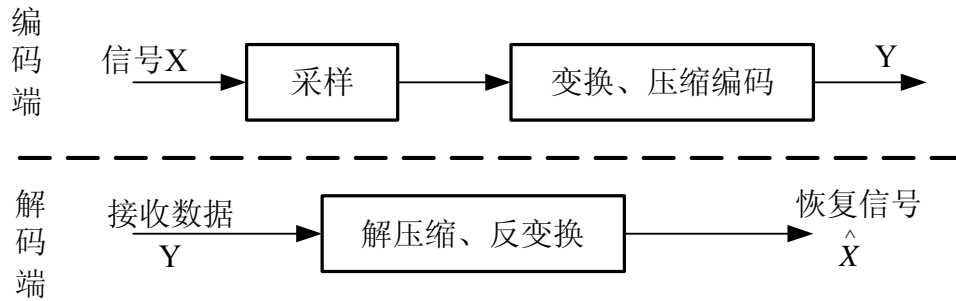


图 2.1 传统编解码理论框图

信号在发送编码端需要先对信号进行采样，采样后将其进行变换压缩编码，之后要么进行传输，要么存储下来。在接收端需要对压缩变换后的数据进行编码端的反变换，即解压缩恢复出原始信号。这种方法，由于采样依据采样定律必须要是信号带宽的两倍以上，这样就对采样速率有着较高的要求，是整个过程中很关键的步骤，不能完整采样的话就不可能把信号信息完完整整保存下来。这种方法占用很大存储资源，对采样器件要求高，对于越来越高的频率应用越来越显得力不从心。

CS 理论的采样压缩过程和传统的方法大为不同，将采样和压缩两个过程合二为一，采样的同时就已经对信号进行了压缩，直接得到的就是压缩后的数据。

或者从另一个角度来讲，压缩传感实际上是先对信号进行了压缩，然后利用合适的观测矩阵使它均匀的打散好使非适应性的低速率采样成为了可能。这样一来相当于以极高的效率使用传输信道。CS 理论相对于传统方法来说就是不再拿来信号就直接进行传输，而是现根据信号的特点把其中水分全部挤出，只把它重要的部分高效的传输出去，减小了资源浪费。与之相比传统的方法就好像一个膨胀起来的气球，涨满了气直接发送，当然就要占用大量的资源了。CS 理论结构框架见图 2.2。

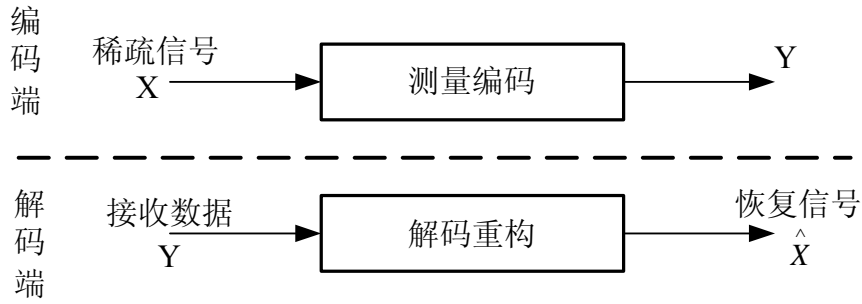


图 2.2 基于 CS 理论的编解码框图

压缩传感包含三个过程：对信号进行稀疏表示、选择观测矩阵进行观测和信号的恢复。如图 2.3

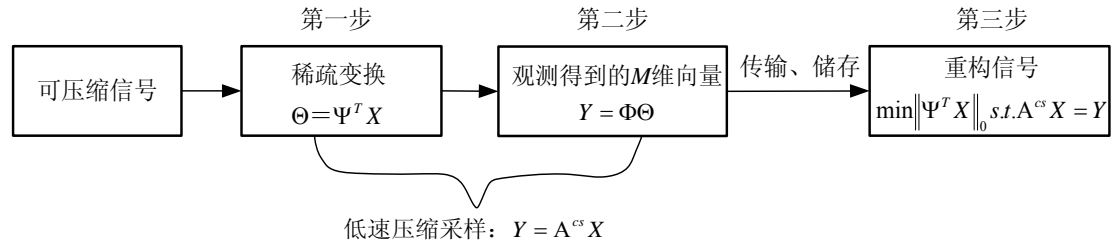


图 2.3 压缩传感理论框架

2.1.3.1 信号的稀疏表示

几乎大部分的自然信号在一些特定的基下都能表现出稀疏性，所以压缩传感理论就有了很大的存在价值。要实现压缩传感的第一步就是要对可压缩信号进行稀疏分解，也就是找到该信号对应的合适的基，将信号在这个对应的特定的基上进行分解。得到的系数就是稀疏信号了，就可以进行下一步了。文献^[2]指出光滑信号的 Fourier 系数、小波系数、有界变差函数的全变差范数、振荡信号的 Gabor 系数等等都足够稀疏，都能够通过压缩感知理论恢复信号。

许多自然信号在找到恰当的基时可以被非常简便的表示。看下面图 2.4 中的

图像和它的小波变换。虽然几乎原图中所有的像素的小波变换系数都是非零值，但同时也显现出一个现象：大多数的系数都非常小，非常少的大幅值系数却反映出图像的大部分信息。

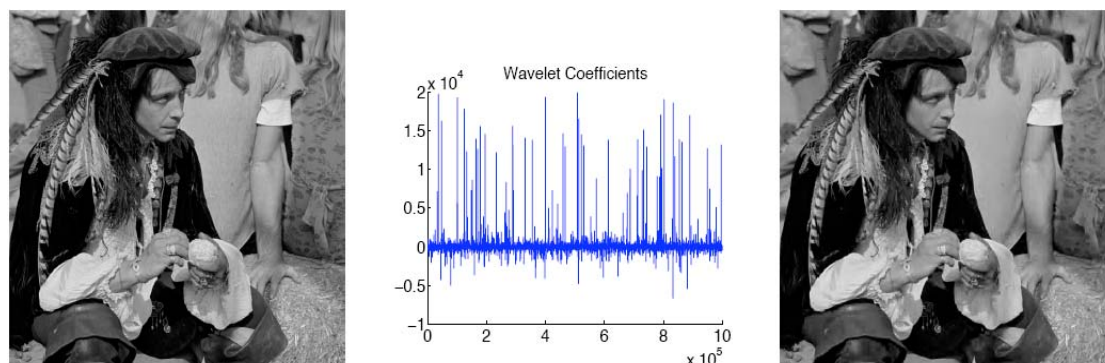


图 2.4 具有稀疏性的自然图像

左边的图像为原始图像,中间为其小波变换系数,很显然大部分的系数都很小,仅取在 0~255 范围内的系数重建图像为右图图像质量没有明显变化,但是数据量却大幅减小.重建图像舍弃了 97.5%的系数.

由上面的例子我们就可以清楚的看出上面的图像,右边的图像仅仅用原始图像的信息量的 2.5%就几乎人眼分辨不出的效果还原了原始图像。这就用事实说明确实自然信号、图像等都是具有很大的稀疏性的,只要找到了其恰当的稀疏基就能以非常小的代价来表示原来大量的数据,为压缩传感提供了前提和基础。怎样才能找到信号对应的最稀疏基是现在 CS 理论研究的一个热点,因为只有找到了那个使信号表达最简便的基,才能以最小的代价,最大速度,最大的效率实现压缩传感。

现在,寻找信号的最稀疏表达,对信号进行系数分解的研究发展出一种非线性、非正交分解方式,或者说是一种非线性逼近的方法。这种方法不再是线性的正交分解^[3],而是信号在冗余字典下的稀疏分解。这是一种全新的信号表示理论:它不用某一种正交基来表示信号,而是用一系列的各种函数,各种基组成一个基函数库,每一组基或者函数之间不再是正交的,而是可以存在一定的相关性。这样的大量的基、函数组成一个库被称作为冗余字典,字典中的元素被称为原子。当然这些基函数也要满足一定的条件它们之间的相关系数必须小于一个特定的值,不然的话过于冗余的基函数库来表示信号,恢复重建时就不可能一对一的实现了。这样选则多组的及函数来表达信号就是可以根据信号的特性找的最稀疏的

基，是信号得到最稀疏的表达。从冗余字典中找到具有最佳线性组合的 K 项原子来表示一个信号，称作信号的稀疏逼近或高度非线性逼近^[4-5]。

2.1.3.2 观测矩阵的设计

CS 理论的一个很关键部分是如何构建好测量矩阵，这是它理论的核心部分。通过合适的矩阵将稀疏信号再次均匀的散布在随机向量上，使小量采样重建原始的信号成为可能。它既要确保少量的稀疏数值能够完整的投影在随机矢量上，还要确保它是均匀散布，不能有相同的两个稀疏值投影在随机向量的同一位置。即既保证原始信号的完整性还要保证信号本身的混叠。不能满足以上条件的观测矩阵是无法使用的，它将使原始信号无法准确重建。矩阵特性满足上述条件的同时它的行数，也就是是随机矢量的个数，或者是观测数量又或者采样点数也是有要求的，它必须满足式 2.7 给出的条件。

现在对观测矩阵的研究是一个热点。Donoho 在他的研究^[6]中指出实际上大部分一致分布的随机矩阵都是可以用来做观测矩阵的，他给出了观测矩阵需要满足的三个条件。这些条件还是比较容易满足的。使用这些矩阵都能够以很高的概率来重建原始信号。但是也只能使很高的概率无法做到绝对的百分之百地成功重建原始信号。对于是否能找到确定的方法来实现还是以后研究的一个重要方向。

国内的学者在对观测矩阵的研究也做出了一定的贡献。方红等人就提出了使用亚高斯随机投影的方法来重建图像^[15]，这种新的观测矩阵可以减小运算的复杂度，提高重建精度，同时也使运算速度得以提高。在这方面不少研究学者都在做着不少的工作。

2.1.3.3 信号的恢复

在 CS 理论中,信号处理的第三个步骤就是要将压缩传感后得到的数据 y 用重建算法来还原原始信号。得到的数据 y ，是 M 维的，长度 M 远远小于原始信号 s 的长度，或者说维数 N ，这样就需要解欠定方程。用 M 个含有 N 个未知数的方程，这样似乎无解，但因为观测矩阵是受 RIP 性质限定的，而且原始信号具有稀疏性，是可压缩的^[1-2]，其中的稀疏度 K 是小于测量数 M 的，这样成功重建原始信号就是可能的了^[7]。

重构算法归纳起来可以分为三类：凸松弛法，贪婪追踪算法和组合算法。

第一种是使用的迭代的方式来对原始信号进行逼近的。先寻找到所有位置中的极大值，把它的值和位置同时记录下来；然后在进行下一次迭代，再把此次迭

代中的极大值和位置记录下来；然后再继续。每一次都记录当次迭代中的极大值和位置，直到此极大值已经小于设定阈值就停止迭代。这样就能在规定的误差下实现对原始信号的最佳估计。它包括MP算法,OMP算法,分段OMP算法(StOMP)^[8]和正则化OMP(ROMP)算法等等。

第二种是将非凸优化问题转化成凸优化问题，通过这种方式来对原始信号进行逼近，得到原始信号的最佳逼近。如BP算法，内点法,梯度投影方法和迭代阈值法^[9-11]。

第三种是一种组合方法有傅立叶采样^[12-13]，链式追踪和HHS(Heavv Hitters on Steroids)追踪^[14]等。

每种算法都有它的优点和缺点。总之，在CS理论中，构造计算量小并且比较稳定的算法来精确的重构出原始信号是最终目的。

2.1.4 应用

CS理论可以通过不相关测量单元高效的捕捉到大带宽信号的特性，给它带来了广泛的应用前景。只要原始信号具有稀疏性，就可以应用CS理论。所以它对人们有着巨大的吸引力，应用及其广泛，吸引着很多的学者对其进行大量的研究。它的应用范围也已经渗透到了众多领域。在数据分解、信道编码、逆向问题、数据获取等等都取得了一定的研究成果。

简单介绍几个经典的应用。模拟/信息转换(Analog-to-Information)，为了简化概念和方便理论推到CS理论最先针对的是离散信号无论时域或者频域等等。但是对于模拟信号的处理也是非常重要的一个部分，这一方面也有很多的学者开始进行了不少的研究。J Laska 等人^[26]提出了一种从模拟信号到信息转换器(Analog to Information Converter ,AIC)的设计框架，见图2.5。

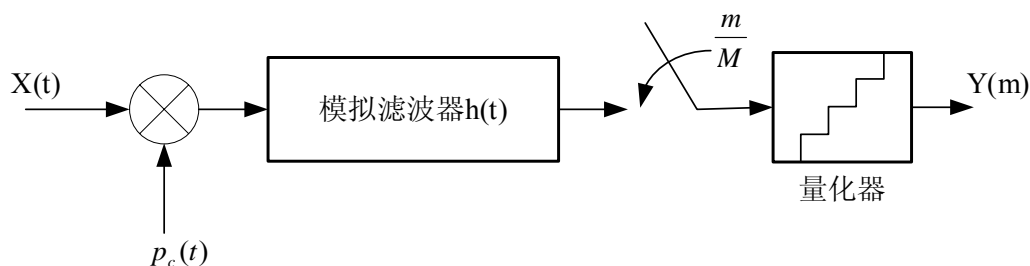


图 2.5 AIC 设计方案框图

它是以CS理论为基础，对于一维信号进行处理，不用观测矩阵，而是用一

种服从伪随机分布的滤波器来对模拟信号进行滤波，滤波后的信号进行下采样，即可以低于原始信号带宽的采样速率进行采样。这和本文做的随机滤波方式的压缩采样利用的是同一思想。这方面的研究仍处在起步阶段，它涉及的方面比较广，不仅仅是信息处理压缩，还要涉及滤波器和电路方面的知识，相当于是一种 CS 理论的一种应用实现，还要做得工作还有很多。

在 CS 理论的实际应用方面美国 Rice 大学做出了不少的工作，他们已经研究出了一种称之为“单像素相机^[27-28]”的设备。它的结构与传统的数码相机大不相同，见图 2.6。利用了 CS 理论对于二维大量的光信号不再采用光学传感阵列直接获取了，而是将进入镜头的光信号先用数字微镜阵列(Digital Micromirror Array)进行投影，相当于对于需要接收的信号用观测矩阵进行观测，观测后的信号用一个光学传感器进行采集。即对信号先进行压缩再进行采样。完全依照 CS 理论的框架对影像进行采集，节省了大量的光学传感器和存储单元。有着不小的研究价值和应用前景。

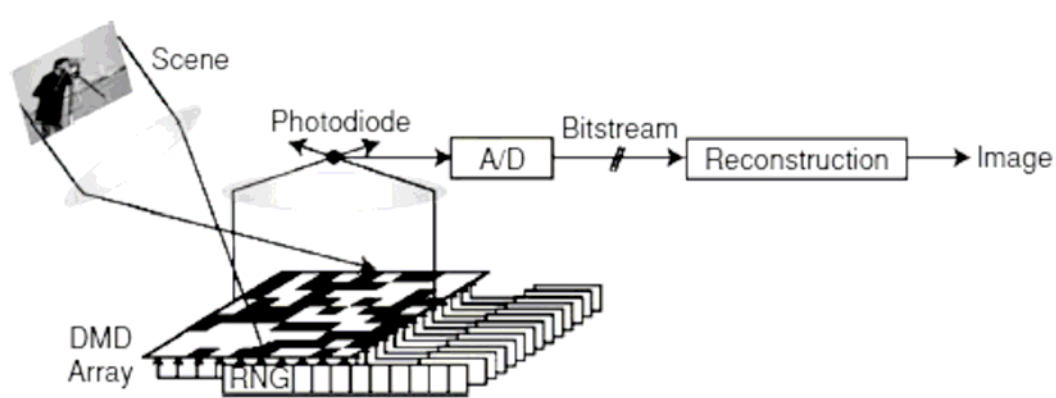


图 2.6 单像素相机原理结构

2.2 超宽带技术

随着科学技术的发展，人们对无线通信技术需求越来越迫切，在这方面做了很多的工作也取得了不小的进展。现在人们需要很多的近距离高速高带宽的通信。超宽带技术提供了一种短距离超带宽、高速的数据传输的通信方式。它的技术特点决定了它有很多的优点。引起了人们广泛的研究兴趣。最早在 20 世纪 40 年代就出现了其技术雏形，是美国军方提出的一种高效的通信技术。50 多年之后才逐渐在民间传播开来。因为它有着高带宽、高速的数据传输、功耗低、安全性能高等特点，所以引起了全球通信技术领域极大的重视。

2.2.1 超宽带无线电的定义

超宽带是近年兴起的一种无线通信技术。何谓超宽带，顾名思义它有着相对比较宽的带宽，美国联邦通讯委员会（Federal Communications Commission, FCC）给出的定义是任意相对带宽高出 20% 或者绝对带宽大于 0.5GHz 的信号，或者传输速率超过 100Mbit/s。从中我们可以看出这是一个相当宽松的定义，并没有给出这种通信方式特定的要求，只是对其带宽做出了一定的规定。

超宽带技术有着悠久的发展历史，在 1989 年之前，一般没有使用超宽带这一术语，提的比较多的是脉冲无线电。到了这一年美国国防部高级研究计划署最先采用超宽带这个说法，并给出了一个定义。对以前没有规定的信号的带宽和频谱结构做出了规定：

若信号的绝对带宽大于 1.5GHz 或者相对带宽大于 25%，这样的信号被称为超宽带信号。在这之后人们就开始使用超宽带这个词了。

何谓绝对带宽和相对带宽，他们这样定义：

$$\text{绝对带宽 } BW_{Absolute} = f_H - f_L \quad (2.10)$$

$$\text{相对带宽 } BW_{Fractional} = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (2.11)$$

其中， f_H 是上限频率， f_L 是下限频率，上下限的定义是以功率衰减幅度为标准的，标准为-20dB。

2002 年 2 月，美国 FCC 才允许民间使用超宽带技术。军转民后 FCC 又对 UWB 信号进行了重新定义。现在用得都是 02 年 FCC 的新定义。这个定义把所有相关内容都从新做了规定。包括信号带宽、使用频段和频谱结构技。规定如下：

- 1 UWB 信号为相对带宽大于 20%或-10dB 带宽大于 500MHz 的无线电信号；
- 2 UWB 通信系统可使用频段为 3.1GHz~10.6GHz；
- 3 UWB 系统的最高辐射谱密度为-41.3 dBm/MHz。

2004 年 4 月，美国 FCC 又给出“超宽带”的两种定义。第一种是针对于对军方的。包括两点修改：

一是对信号的带宽定义做了修改上下限频率 f_H 和 f_L 不再是峰值功率-20dB 时对应的频率点了，而是改为-10dB。

二是信号的相对带宽不是 25%了而是大于等于 20%，定义更加的广泛了。

另外一种是不针对于军方了，而是所有。而且定义的更加自由了，更多的形式的信号都可以纳入 UWB 信号的定义内。定义只有一点：只要信号峰值功率下降 10dB 时所对应的上下限频率之间的绝对带宽大于或等于 500MHz，就可以称为 UWB 信号。相对带宽不再重要。

从上面的定义中我们可以看出，超宽带规定的非常灵活，仅仅对信号带宽做出了规定，其他的具体的实现方式等等都没有规定，所以就有多种不同的实现方式。UWB 所占频谱与其它无线技术的频谱关系如下图 2.7。

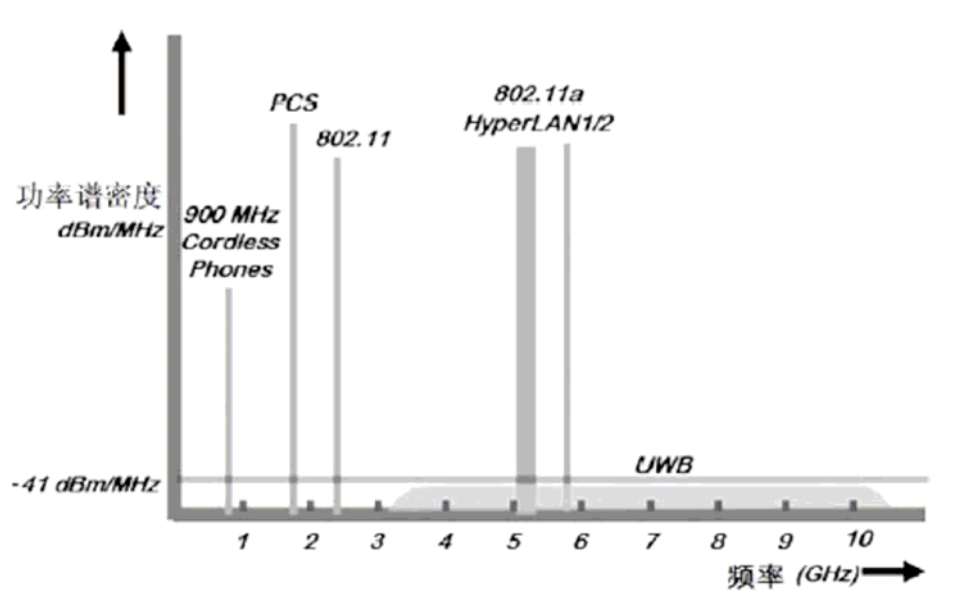


图 2.7 UWB 其它无线技术的频谱关系示意图

比较常用的一种实现方式是利用脉冲波形产生高带宽的信号。这种方式叫冲激无线电（Impulse Radio, IR）又称脉冲无线电。它是用占空比很低的窄脉冲作为发射信号。

根据香农公式

$$C = BW \times \log_2(1 + SNR) \quad (2.12)$$

其中，C=信道容量，BW=信道带宽，SNR=信噪比

从上面公式我们可以很容易得出这样的结论：当信噪比是一个确定的值时，该信道的容量与信道带宽是成正比关系的。超宽带信号的波形是纳秒到微微秒级的窄脉冲，其所占的频谱范围很宽，所以信道容量非常大。有着很广泛的应用。

FCC 规定，3.1GHz 到 10.6GHz 之间频率供 UWB 使用。频谱图如下：

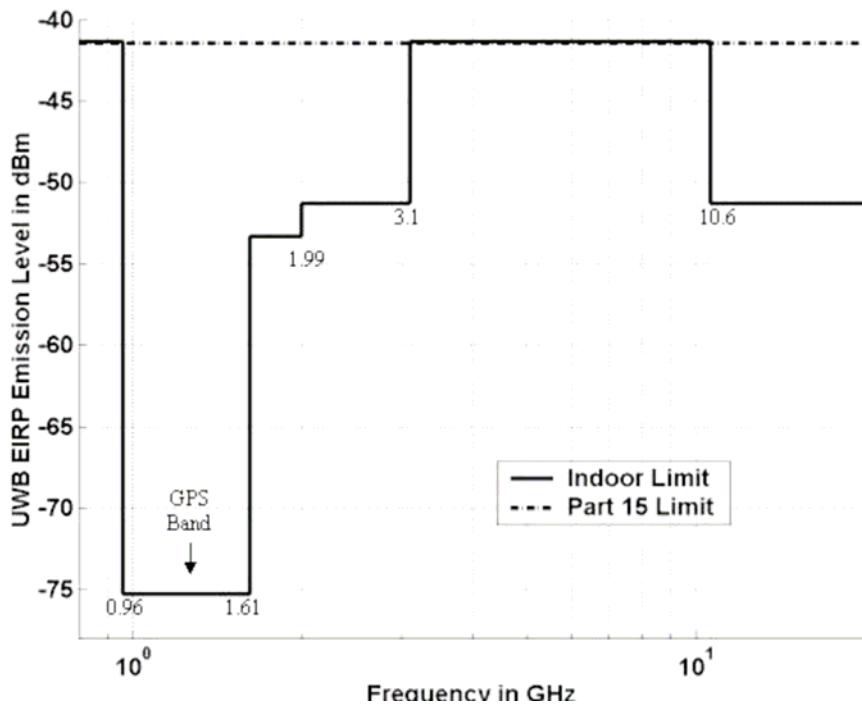


图 2.8 FCC 对 UWB 通信规定的频谱

2.2.2 超宽带信号的产生和传播

脉冲信号的波形和调制方式决定了超宽带无线通信系统辐射的频谱。所以需要研究的脉冲波形和调制方式。除此之外信道对于通信系统非常重要，所以必须研究信道情况，确定合适的信道模型。基于此，本章主要介绍了这三方面的基本知识，也为后续内容做一个铺垫。

2.2.2.1 脉冲波形

脉冲波形对 UWB 系统来说非常重要。波形的好坏直接影响了 UWB 的系统性能。它需要波形在时域和频域内都要收敛，不然的话很多能量泄露在频带之外，既浪费了大量的能量还对信号本身的质量有影响，而且还会对其他无线电设备有较大的影响。常用的超宽带信号波形有以下几种。

1 Gaussian Pulse(高斯脉冲)

时域表达式

$$w(t) = A \exp \left[- \left(\frac{t - T_c}{T_{au}} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

其中，A 是脉冲幅值， T_c 是时间偏移， T_{au} 是脉冲形状参数。它的波形和功

率谱密度如图 2.9 所示。

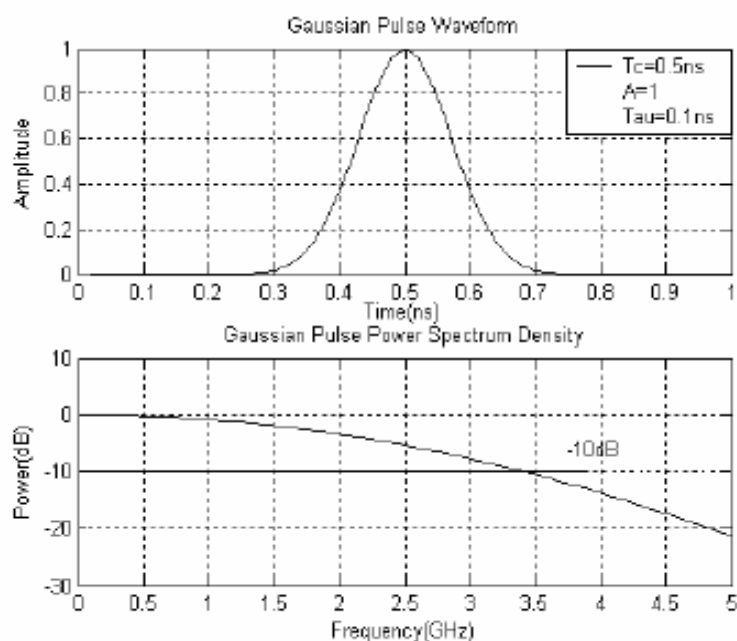


图 2.9 高斯脉冲波形及功率谱密度

2 Gaussian monocycle(高斯单循环脉冲)

高斯单循环脉冲与高斯脉冲的一阶导相似，其表达式为

$$w(t) = 2 \times A / T_{au} \times \sqrt{e} \times (t - T_c) \exp \left[-2 \times \left(\frac{t - T_c}{T_{au}} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

波形和功率谱密度如图 2.10 所示。

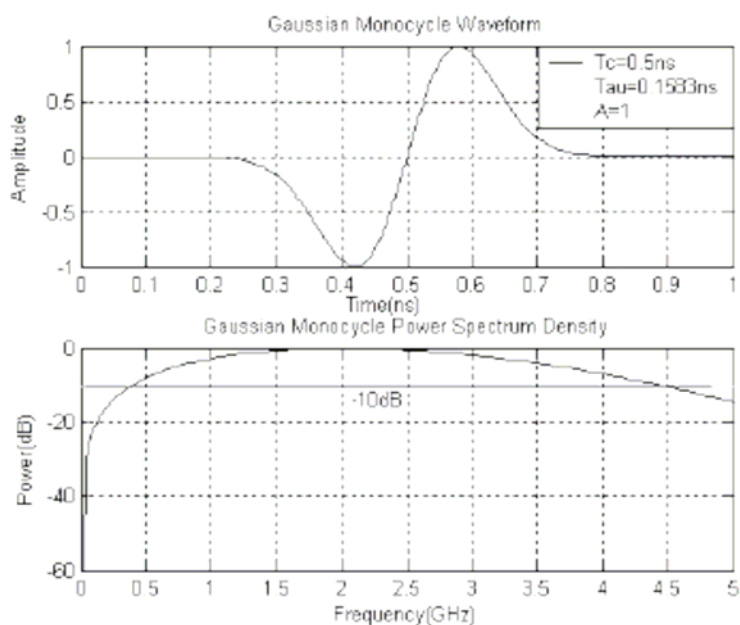


图 2.10 高斯单循环脉冲波形及功率谱密度

3 Scholtz's monocycle

这种单循环脉冲由 Scholtz 博士的提出，所以被叫做作 Scholtz's monocycle。它与高斯脉冲的二阶导相似，其表达式为：

$$w(t) = A \left[1 - 4\pi \left(\frac{t - T_c}{T_{au}} \right)^2 \right] \exp \left[-2\pi \left(\frac{t - T_c}{T_{au}} \right)^2 \right] \quad (2.15)$$

波形及功率谱密度如图 2.11

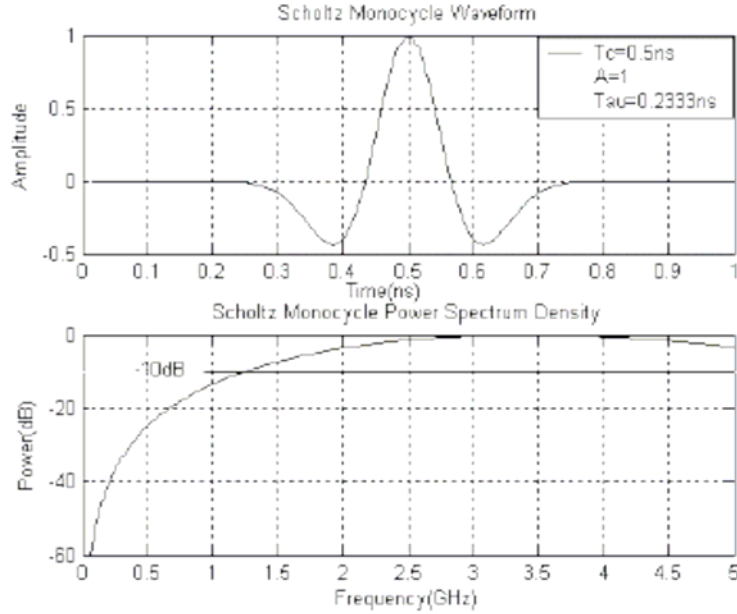


图 2.11 Scholtz 波形及功率谱密度

除此之外还有升余弦脉冲、Hermite 多项式脉冲等等多种脉冲都可以作为 UWB 的脉冲波形，由于高斯脉冲容易产生、易于控制，所以本文采用高斯脉冲作为模拟波形。

2.2.2.2 脉冲调制方式

脉冲调制方式有很多种。有数据信息调制、多址接入调制还有两者结合的混合调制方式。

数据信息调制从调制脉冲的个数来分有单脉冲调制和多脉冲调制。此外它包括脉冲幅度调制(Pulse Amplitudemodulation, PAM)、脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)、数字脉冲间隔调制(Digital Pulse Interval Modulation, DPIM)、脉冲波形调制(Pulse Wave Modulation, PWM)开关键控(On Off Keying, OOK)、二元相位键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)等等^[29-30]。

多址调制方式是同一信道多个用户共同使用。包括 TH-UWB、DS-UWB 和

多级跳频带^[31]等方式。下面简单介绍几种

1 PPM-TH 调制

跳时脉冲位置调制利用脉冲在时域的不同位置来表示信息。利用跳时来区分不同的用户。一个时间帧由多个用户共同使用，帧内不同时间片段由不同的用户占用。用“0”代表脉冲无偏移，“1”代表有偏移。它的表达式为

$$s(t) = \sum_{j=0}^{+\infty} p(t - jT_f - c_j T_c - T_m) \quad (2.16)$$

其中， T_f 是帧周期， c_j 代表跳时扩频码，是 chip 周期， T_m 代表脉冲的时间偏移。跳时码就是用来区分用户的编码。一帧均匀分成几个片断，每一个就是一个 chip， T_c 是 chip 的长度。二进制用有无偏移量来区分数据。

如图 2.12 所示，每帧中有三个 chip，脉冲在 chip 中所处的位置由跳时码决定。图 2.12 中以 0 表示无偏移，1 表示偏移，则波形图表示的数据为：1111100000。

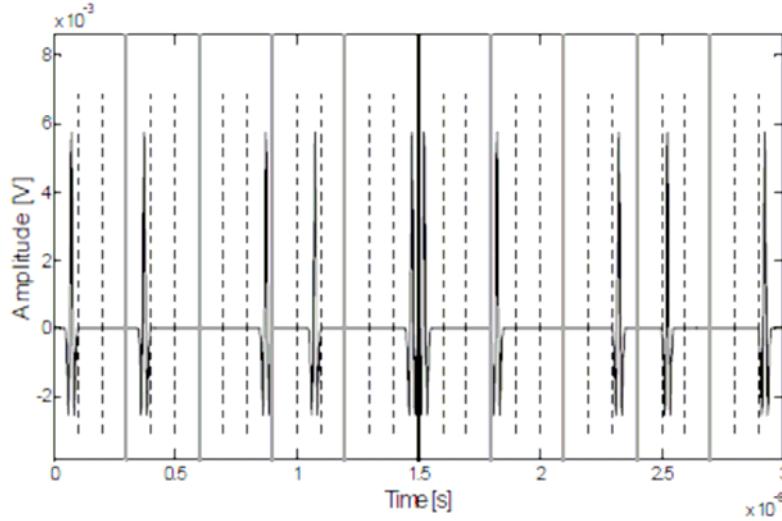


图 2.12 二进制 PPM-TH 波形仿真图

2 BPSK-TH 调制

BPSK-TH 是一种相位调制方式，与反极性脉冲幅度调制原理一致，它利用正脉冲波形表示 0 用负脉冲波形 1。它的表达式为

$$s(t) = \sum_{j=0}^{+\infty} a_j p(t - jT_f - c_j T_c) \quad (2.17)$$

其中， T_f 是帧周期， c_j 代表跳时扩频码， T_c 是 chip 周期， $a_j \in \{-1, 1\}$ 表示相位差 180°。图 2.13 是它的仿真图。

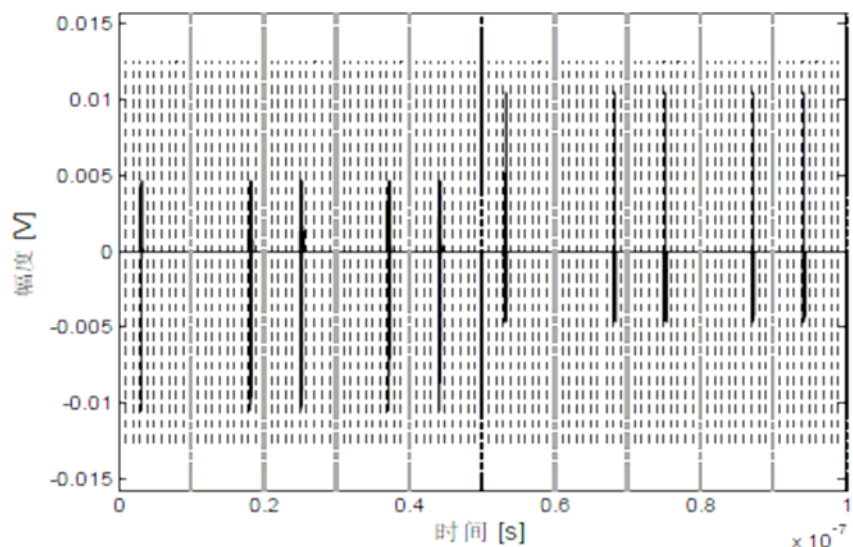


图 2.13 BPSK-TH 波形仿真图

如图所示，这里每帧有十个 chip，每个脉冲由跳时码决定在帧里占用不同的 chip，具体的数据由脉冲的正负确定。正脉冲表示 0，则图 2.13 中数据为：1111100000。

3 BPSK-DS 调制

直接序列二元相位键控由式 2.18 表示

$$s(t) = \sum_{j=0}^{+\infty} d_j \sum_{l=0}^{N_c} c_l p(t - jT_f - lT_c) \quad (2.18)$$

其中， $d_j \in \{\pm 1\}$ 为了区分幅值， c_l 为扩频码， T_f 为帧周期， T_c 为 chip 周期， N_c 表示发送一个符号所用的脉冲个数。这也是现在比较长用的多址方式。这种编码方式采用重复编码，用多个脉冲只来表示一位数据，如图 2.19 所示，这一串符号只发送两位数据：10。两个符号极性相反，每十个脉冲代表一个符号。由符号和扩频码结合确定脉冲的极性。这里扩频码为：[1 -1 1 1 -1 -1 1 -1 1 1]。

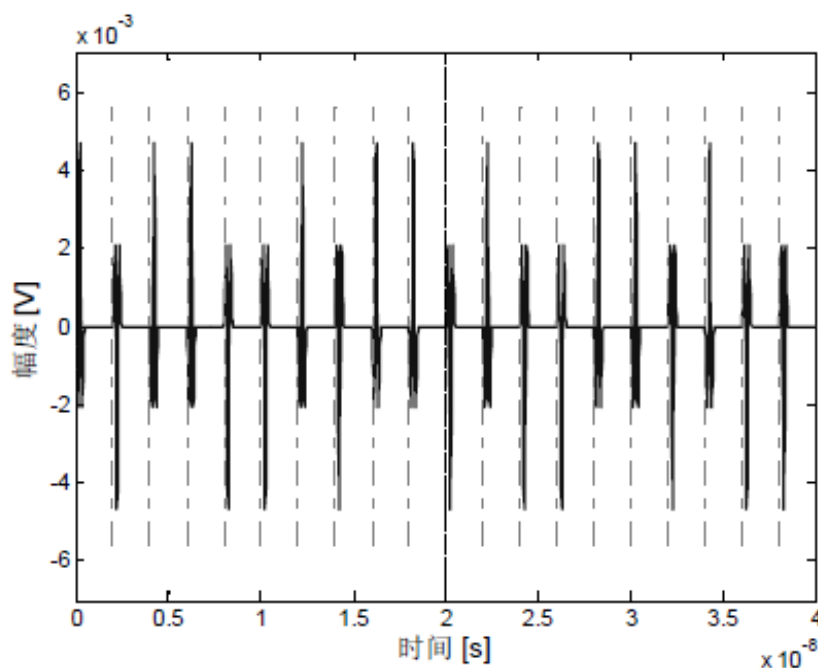


图 2.18 BPSK-DS 波形仿真图

2.2.3 超宽带技术的优点及面临的问题

2.2.3.1 技术优点

超宽带无线通信系统与传统通信系统相比有很多优点。

1) 系统结构简单，很多 UWB 系统都是以基带的形式发送信号的，与传统的通信系统相比不需要载波直接发射不需要变频功放和混频器等等传统通信系统必须总要组成部分，所以电路结构比传统发射机简单，允许采用非常低廉的宽带发射器通信实现成本低。

2) 信号带宽大，可以传送大量的信息。是宽带个人通信的方面的很好选择。

3) 保密性好，信号发射功率谱密度不容易接收，容易加密，很难被非授权用户破解。

4) 功耗低，UWB 系统发射功率小并且是间歇发送脉冲传送数据。所以非常的省电。

5) 抗衰落和干扰性能强，适合在室内使用。比其他方式具有更强的抗干扰性。

6) 定位精度高，因为脉冲所占时间极短，所具有极高的定位精度。甚至能够实现隔墙成像，可在室内和地下进行精确定位，具有很高的应用价值。

2.2.3.2 面临的问题

超宽带信号多径分辨能力很强,但是在室内,多径数量太大,需要使用 RAKE 接收技术。但是用于频率太高,RAKE 接收机结构太复杂,会需要强大的计算能力,就会增加接收机的功耗。怎样降低复杂度,是一个亟待解决的问题。

1) UWB 与其他无线的干扰

UWB 系统虽然在频率很高,但是大多数的基带信号会对常用的无线频段产生很大的干扰。当然由于 UWB 的信号频谱低功率性也容易被其他系统干扰。如何高效利用频谱就是一个很重要的研究课题了。

2) 时间精准性问题

UWB 由于它的高带宽性,所以它的脉冲所占时隙特别的短,如何快速的时间采集对于系统的同步来说是一个比较困难的问题。

3) A/D 转换问题

UWB 的频率大大提高需要高速率采样芯片,但是现有的技术对于高速的采样需求还是有些达不到要求。

第三章 压缩传感在超宽带通信中的应用

3.1 压缩传感应用在超宽带中的原理

采样是超宽带通信的瓶颈。这里提出一种基于 CS 理论框架下的 UWB 实现方式。我们同时证实了，要实现基于 3.1~10.6GHz 更或者 60GHz 的超宽带系统带宽需要的硬件，如果采用传统的采样技术，至少还要再花费很长的时间才能工业实现或者低成本实现。

UWB 为无线通信做出了一个新的范例。史无前例的无限带宽带来了很多的优点，例如对于平坦衰落的抗干扰性等。存在两个主要的挑战：(1)如何收集大量的，各个多径通道部分的能量；(2)极高的模数转换采样率。对于第一个问题，时间反转提供了一个很有希望的解决途径。特别的，时间反转已经在实时的硬件测试层得到了证实。时间反转的核心是将信道本身当做收发机的一部分。当信道是时不变对等信道时，这种思路能够感应到终端的微量移动。原则上大部分在接收机的处理部分都可以移动到发射端，因为这里有足够的能量来实现很多的高级算法。

很自然一个问题就浮现在我们面前：我们把接收机的硬件复杂度移到发射端，对于 5GHz 的 UWB 将模数转换的采样率降低到 500Msps 的水平——那样的采样率对于商业解决方案来说是极高的动态范围，这种方法是否可行，幸运的是压缩传感对于我们目标是提供了一个很好的方法。我们将采用随机滤波的方法来实现对 UWB 信号的压缩传感得以实现低速率采样。

3.1.1 随机滤波方法

CS 理论是要将可压缩的信号直接线性投影得到高效的表达。这种对于稀疏信号来说效率是很高的。我们可以用由正交基得到的一个线性组合组成的很短的矢量来逼近原始信号。信号的重建是超限问题，需要更有效地贪婪追踪算法来实现。但是他并不适合用于实时信号或者大量数据的情况，因为测量信号的过程需要即时的接触到完全的信号。测量不是时不变的，重建算法非常耗时。

这里讲述的随机滤波的方法是一种新的获取可压缩信号的方法。我们尝试将信号 s 通过 h 长的有限长随机滤波器(FIR)，然后在对通过后的信号进行下采样，得到压缩后的信号 y 。图 3.1 描述了信号过程，重建 s 需要采用非线性算法。

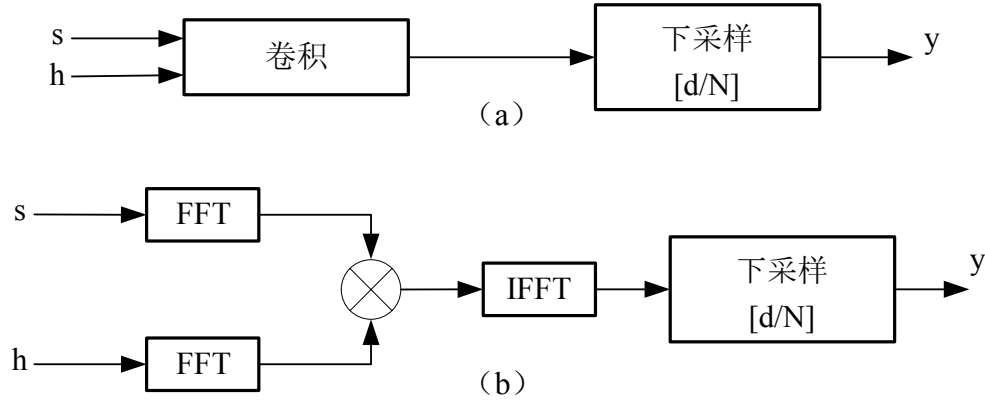


图 3.1 随机滤波框图

框图给出了实现随机滤波的两种方法：

- 1 将信号 s 直接通过随机滤波器然后对信号进行下采样。相当于就是将 s 与 h 进行卷积，得到的结果下采样得到信号 s 压缩后的表达 y 。
- 2 分别将输入信号 s 和随机滤波器函数进行傅里叶变换得到两者的复域表达直接相乘，将得到的结果进行傅里叶反变换，变回时域后在进行下采样得到信号 s 压缩后的表达 y 。

第一眼看上去也许会让人觉得这种方法不行，将原始信号变成了无用信号。然而事实上并非如此，随机滤波的方法完全能够得到各种类型的可压缩信号的主要内容。同时随机滤波的结构原因，他可以大大加速采样和重建的时间。他有如下几个优点：

- 1 得到的测量信号是非自适应时不变的
- 2 测量算子可存储，应用效率高
- 3 我们可以通过加长滤波器来进一步降低采样率
- 4 可以推广到数据流或者时域连续信号

下面将介绍如何用随机滤波器来捕捉有限长离散时间信号。

3.1.2 编码方式

给出一个随机滤波器，其长度为 B 。注意到滤波器仅仅需要 $O(B)$ 个存储空间。得到一个长度为 N 的 M 维信号我们需要计算

$$y = D_{\downarrow}(h * s) \quad (3.1)$$

这里 D_{\downarrow} 是以 $[N/M]$ 为比率进行下采样。注意到因为这个过程是线性的，所以从 s

到 y 的映射可以被看成

$$y = \Phi x \quad (3.2)$$

这里 Φ 是 $M \times N$ 的矩阵。这个矩阵是带状的 quasi-Toeplitz 矩阵。其中每一行都有 B 个非零元素，每一行都是上一行右移 $[N/M]$ 个位置。

两种方法：

方法 1 用图 3.1(a)描述的方式，运行线性卷积然后同时下采样。因为 $n=0,1,\dots,N-1$ ，所以 n 个测量单元的计算如下：

$$y(n) = \sum_{j=0}^{B-1} s(n[d/N] + j)h(B-j) \quad (3.3)$$

计算 N 个采样单元需要 $O(BN)$ 的计算量。这种方法可以被应用于输入信号 s 为数据流的时候，因为采样为时域的，而且是时不变的。

方法 2 用图 3.1(b)描述的方式，用快速傅里叶变换（FFT）的方法来计算卷积。这种情况下我们计算：

$$y = D_{\downarrow} F^{-1} \{H(\omega)S(\omega)\} \quad (3.4)$$

这里等效于使用轮换矩阵 Φ 。所需要的计算量为 $O(d \log d)$ 独立于滤波器长度和采样数量。现对于第一种方法如果滤波器比较长的话，运行速度会快。不过无论如何完整的信号都必须即时表达出来。

采样的数量

捕捉一系列的信号所需要采样的数量有以下几个因素决定：

- 1 长度为 N 的信号的系数水平 M
- 2 随机滤波器的长度 B
- 3 传感采样矩阵与稀疏基的相关度。当 $\Phi\Psi$ 中的元素很少的时候信号获取只需要非常少的采样数。

一个信号如果是时域稀疏的话，即 $\Psi=I$ ，那么用随机滤波的方法的将是很困难的，因为 I 与大多数的矩阵都有较大的相关性。如果想要高效的恢复时域系数信号的话，几乎需要完全的高斯随机矩阵。如果减小滤波器的长度，那么就必须增加采样的数量；如果信号是频域稀疏的话，那么采样数量就和滤波器的长度关系不大了。4 位长度的滤波器就可以很高的概率来重建原始信号了。

3.1.3 信号恢复算法

从压缩后的数据中重建原始信号需要非线性算法。相关的 CS 理论文献中讲到了主张采用贪婪算法。例如正交匹配追踪 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 和树形匹配追踪 (Treebased Matching Pursuit, TMP), 或者基于 l_1 范数优化算法。这些算法都可以加速随机滤波的方法中。我们在本文中采用 OMP 算法来恢复原始信号。算法的输入是随机滤波器 h (滤波器确定了观测矩阵 Φ), 稀疏基 Ψ 和压缩后的数据 $y=\Phi s$, 算法给出了 N 位置和估计出的相应非零单元 θ 的值。

3.2 应用系统的模型

CS 理论已经被应用于 UWB 通信中。我们的主要工作是以在发射端做基于波形的预编码的方法将通道本身作为压缩传感的一部分。在接收端只需要做低速率的模数转换, 图 3.2 给出了系统结构。如果采用传统的采样技术, 频率很高的超宽带系统目前根本无法工业实现。

根据前面的 CS 理论知识我们提出一种基于 CS 理论的 UWB 系统, 通过这种方式采样率至少可以降低到 Nyquist 频率的 10% 以下, 系统结构如图 3.3 所示:

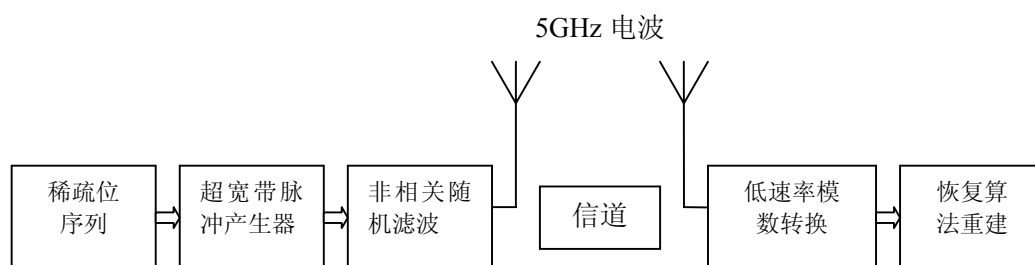


图 3.2 系统结构框图

将进行传输的 UWB 信号是一个位稀疏序列, 通过一个超宽带脉冲发生器和一个预编码器, 通过信道后接收到的信号直接进行低速率的数模转换, 然后用恢复算法重建原始信号。投影矩阵 Φ 包括了编码滤波器和通道。这里可以看到通道本身也成为了投影观测矩阵的一部分。只进行低速的数模转换, 接收机部分就可以做得比较简单了。在模拟中我们用 512M 的 A/D 转换器以很高的概率成功的重建了 3~8GHz 的 UWB 信号。

K 脉冲位置调制 (pulse position modulation, PPM) 是用来调制位稀疏序列的。PPM 信号都是 K 稀疏的: 每个信号都有 N 个位置但是只有 $K \ll N$ 个脉冲如

图 3.3 所示:

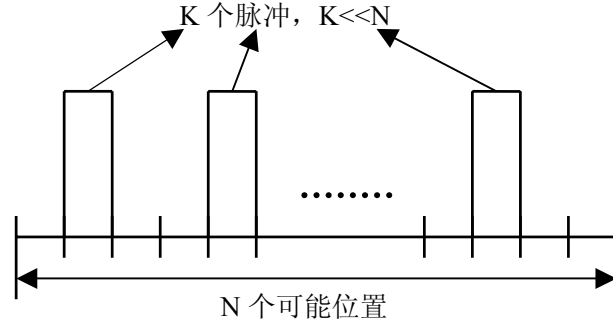


图 3.3 PPM 波形

UWB 脉冲产生器由下式表示:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N-1} \Psi_n(t) \theta_n = \Psi(t) \theta \quad (3.5)$$

$$\Psi(t) = [\Psi_0(t), \Psi_1(t), \dots, \Psi_{N-1}(t)] \quad (3.6)$$

$$\theta = [\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}]^T \quad (3.7)$$

$$\Psi_n(t) = p(t - nT_p) \quad (3.8)$$

这里 $p(t)$ 是 UWB 脉冲产生器, T_p 是脉冲持续时间。预编码器和通道被看成有限长滤波器 FIR, 复合的脉冲响应为:

$$h(t) = f(t) * c(t) \quad (3.9)$$

$f(t)$ 和 $c(t)$ 分别是预滤波器和通道的冲击响应。对接收信号 $y(t) = h(t) * x(t)$ 以采样周期为 T_s 的频率来进行数模转换。下采样后就相当于得到 $M \times 1$ 的矢量 y 。

$$y = \Phi \Psi \theta = \Theta \theta \quad (3.10)$$

这里 Φ 是 quasi-Toeplitz 矩阵。现在 UWB 通信问题就变成了从 $M \ll N$ 的采样单元来估计 $\hat{\theta}$, 这就和下式变成了一样的问题。

$$\hat{\theta} = \arg \min \|\theta\| \quad s.t. \quad y = \Phi \Psi \theta \quad (3.11)$$

成功的重建原始信号除了依赖于稀疏度 K 外, 还依赖于基 Ψ 和观测矩阵 Φ 的相关度。稀疏度只要我们控制发送信号序列就可以满足稀疏的要求, 我们模拟中使 $K=1$, 这意味每个 PPM 码只有一个脉冲。不相关性只要我们选择好恰当的预编码滤波器就能满足要求。我们这里用得是伪随机序列 (Pseudo-noise

Sequence, PN), 其码片率与 UWB 脉冲 $p(t)$ 的带宽相同。通过模拟我们发现 θ 可以成功的用回复算法重建。目前为止我们讨论的都是基带信号, 如果需要传送的 UWB 信号是带通的, 只要将它搬移到所需频率, 而 PN 序列的码片速率只需要保持 $p(t)$ 的带宽即可。在接收端不需要进行下变换直接下采样就行。

采样点的数量 M 和采样速率依赖于滤波器 $h(t)$ 的长度, 如果 $h(t)$ 长接收到的信号在时域的延伸就长, 就需要更多的采样数量。

下采样后得到信号 y 根据 Θ 来使用 OMP 算法来处理。要得到 Θ 就必须知道 $f(t)$ 、 $c(t)$ 和 $\Psi(t)$ 。 $f(t)$ 和 $\Psi(t)$ 是已知的而且是固定的。可以从先验知识得到。但是通道必须被估计出来。这部分相关文献做了研究这里就不再累述。

第四章 实验过程、结果及分析

4.1 实验过程

我们这里仅考虑非常理想的情况，UWB 通信过程中是在室内的固定位置的情况下做实验。所以 UWB 信道是稳定的没有移动的。实验中我们假设信道估计的过程和通信的过程都是时不变的。为了简化实验，我们先不考虑信道，因为在我们的假设下，UWB 信道虽然是稀疏的但他是确定的，只要他是确定的，加入的信道只要增加一步运算就可以实现。现在我们将实验的重点放在仅仅采用 Nyquist 频率 5%及以下速率的 A/D 转换器，观测矩阵减小一半以上的这种情况下是否能够较好的重建原始信号。

在模拟中，每一个 PPM 码元含有 256 个可能的位置，包含 8 位的信息。选择稀疏度 $K=1$ ，这是图 3.4 的特殊情况，因为增加 K 值只是增加每符号的信息量，先将情况简化到最简单情况。UWB 脉冲波形产生器产生的波形，我们选择带宽为 5GHz 高斯脉冲，也就是说波形的脉宽为 0.2ns。因为高斯脉冲在频域内也是能量聚集的，在通带外的能量很少。相邻脉冲之间的时间间隔也为 0.2ns，一个 8 位的 PPM 码元一共 256 个可能位置，持续的时间就为 51.2ns。

用伪随机序列来对输入的稀疏序列进行预编码，即是用 PN 序列进行随机滤波。伪随机序列的码片速率与 PPM 中脉冲的带宽一致，都是 5GHz。因为我们将情况简化到最简单的情况，暂时先不考虑信道。信号通过随机滤波器后直接进行下采样得到 y 。此过程就相当于 CS 理论中的观测阶段。是将已经稀疏的信号利用随机矩阵进行观测。但与一般的观测矩阵不同的是：

- 1) 此观测矩阵不是完整的随机矩阵，矩阵中非零元素只有完整矩阵的一半以下
- 2) 此观测矩阵具有一定的结构，是 quasi-Toeplitz 矩阵。每一行中的非零元素既是 PN 随机序列，长度和滤波器长度 B 相等

由于随机滤波的方法等效的 quasi-Toeplitz 矩阵的特殊性，使得重建时大大减小了运算量，极大的提高了运行速率，减小了此方法的实现难度，为以后实用打好了不错的基础。实验时试用了两种随机滤波器，一是均匀分布的二元随机序列 $(0, 1)$ ，二是均匀分布在 $[0,1]$ 的随机序列。分别对两种滤波器的效果进行了

对比。

对下采样后得到的 y 利用正交匹配追踪算法进行重建。重建后的信号和原始信号进行对比。模拟的过程中在相同滤波器长度的情况下实验下采样频率可以降低到多低。然后又寻找在较低的下采样频率下较为合适滤波器长度 B 。

4.2 实验结果

下面将各种条件下是检验结果一一给出。

4.2.1 随机滤波器的实验结果

5GHz 基带 UWB 信号分别通过均匀分布的二元随机序列 (0, 1)，二是均匀分布在 [0,1] 的随机序列后的得到信号重建结果。滤波器长度 B 为 128。

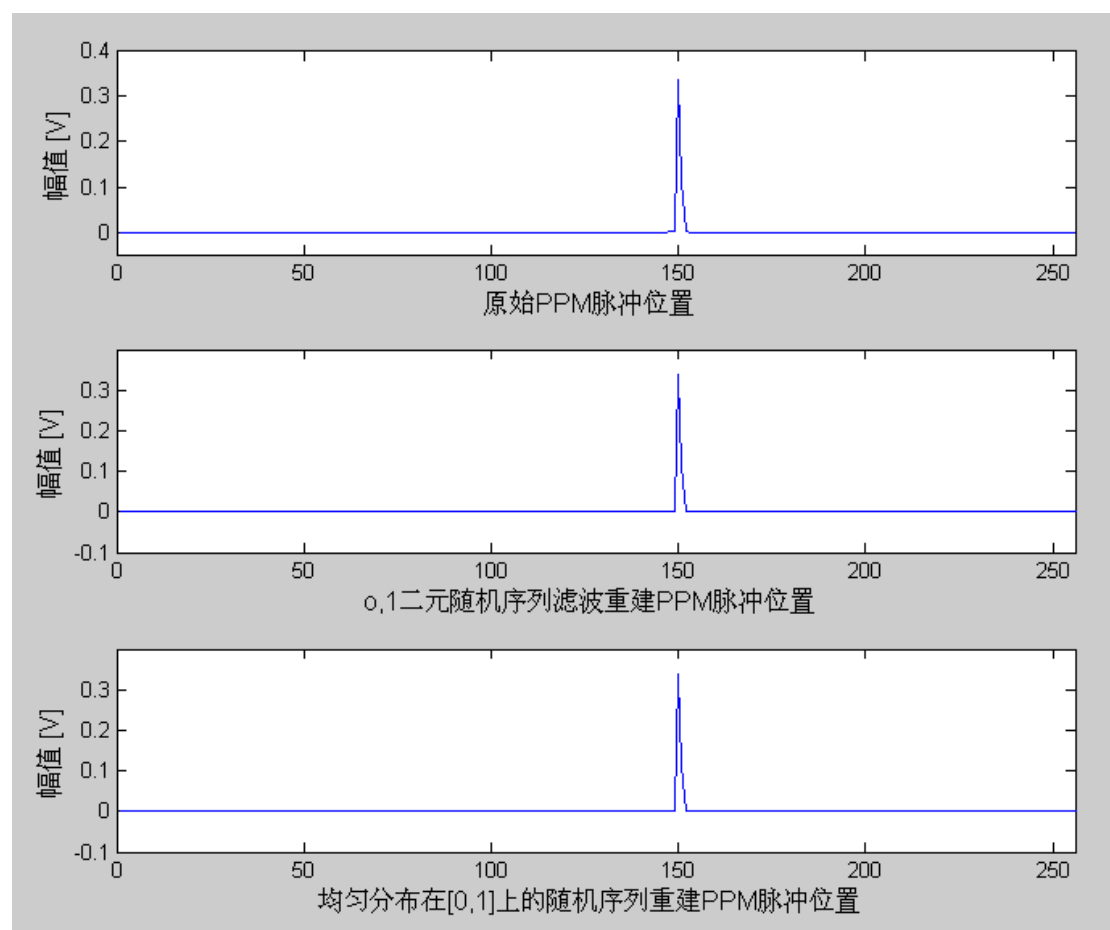


图 4.1 两种滤波器成功重建后得到图形与原始信号的对比

不成功重建的波形如图 4.2 和 4.3 所示：

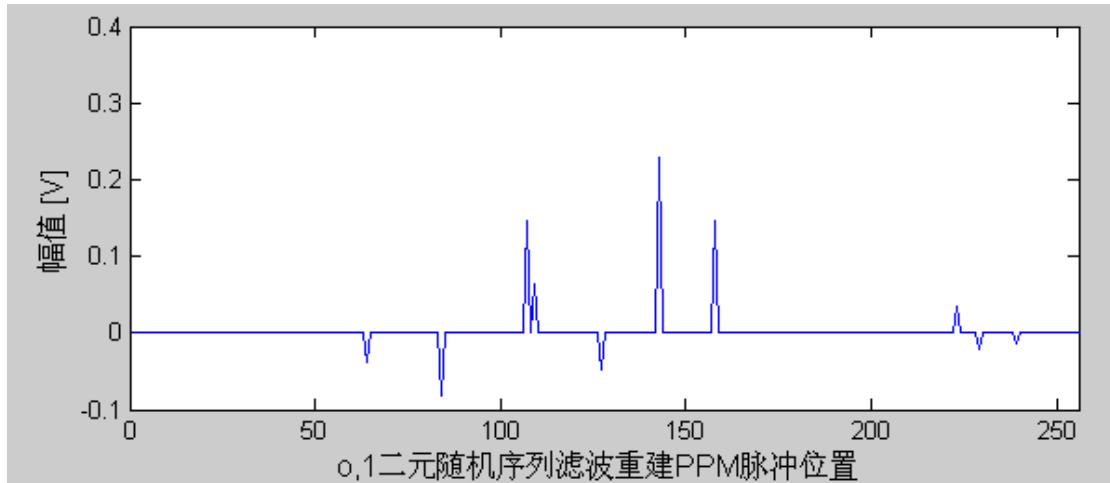


图 4.2 0,1 二元随机序列滤波不成功重建原始信号波形图

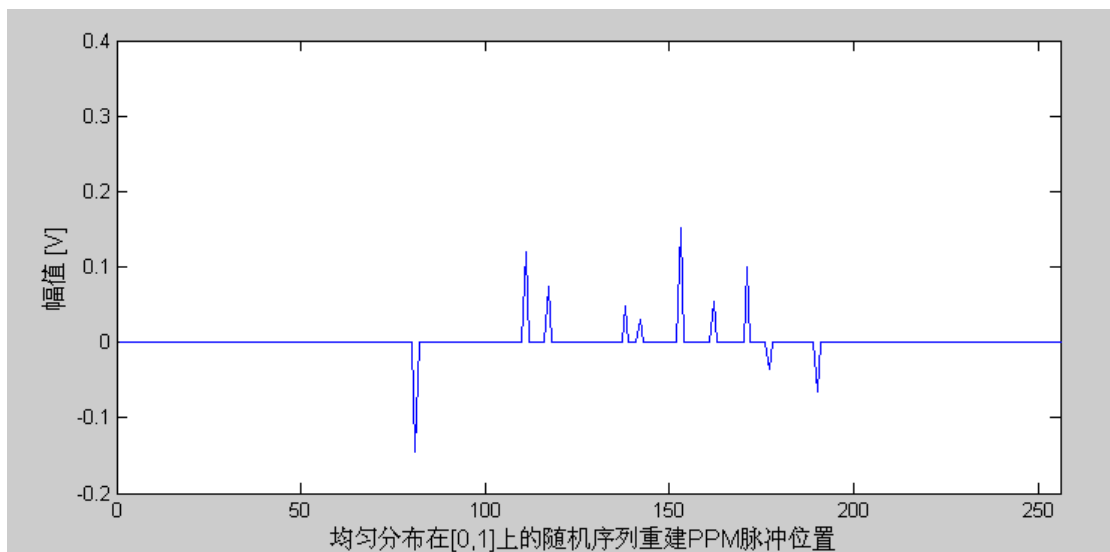


图 4.3 均匀分布在[0,1]上的随机序列不成功重建原始信号波形图

两种滤波器都能够重建原始信号，但是两种滤波器在相同条件下成功重建原始信号的概率并不相同。每种滤波器重复模拟 500 次计算成功重建的概率。模拟后得：0,1 二元随机序列滤波成功重建原始信号的概率为 78.4%，均匀分布在[0,1]上的随机序列成功重建原始信号的概率为 53%。

4.2.2 实验滤波器长度

5GHz 基带 UWB 信号通过均匀分布的二元随机序列 (0, 1)，得到的信号 y 用分别用 256MHz, 500MHz, 1GHz 的 A/D 转换器进行下采样。滤波器长度 B 选择 32, 64, 128, 256, 512 分别计算其成功重建原始信号的概率。每种情况模拟 500 次，得到重建原始信号的概率。模拟所得结果见下表：

表 4.1 模拟结果数据

滤波器长度 \ 频率	250MHz	500MHz	1GHz
B=32	无法重建	无法重建	无法重建
B=64	无法重建	无法重建	90.6%
B=128	无法重建	78.4%	100%
B=256	$\approx 20.8\%$ *	83.8%	100%
B=512	27.2%	81.8%	100%

注：* 无法完成 500 次模拟，平均下来的重建概率

4.3 实验数据分析

根据所做模拟得到以下结论：

- 1) 将压缩传感理论应用在超宽带通信中，突破 Nyquist 采样定律确实是可行的；
- 2) 使用随机滤波的方式实现压缩传感是可行的，可以大大缩短运算所需要的时间，实现信号的实时处理，因为其观测矩阵不是完整的随机矩阵，而是具有一定结构的 quasi-Toeplitz 矩阵。这种矩阵的特点决定了比使用其他的完整的观测矩阵，速度要快的多；
- 3) 随机滤波器的选取很重要，不同的随机分布会对重建原始信号的概率有着较大的影响；
- 4) 采样率的提高对于重建原始信号概率的提高起到很大的作用；
- 5) 滤波器的长度对重建概率的提高也能起到促进作用，但是没有采样速率提高起到的作用明显；
- 6) 根据模拟结果可以看出来并不见得滤波器的长度越长重建的成功概率就会越高，在一定范围内增加滤波器长度能够提高重建概率，但是超过之后只能大量的增加运算时间却不能再提高重建概率；
- 7) 根据模拟结果如果从比较经济的角度来说，采样速率 500MHz，滤波器长度为 256，这样的话运行速度和概率都有一定的保证，可以通过其他的一些方式再来减小其错误率；

8) 如果要保证正确率选择 1GHz 的采样率, 使用比较短的滤波器同样可以以较快的速度来实现高概率重建, 只不过下采样的效果就没有那么明显了。但是客观的讲, 即使下载采样率为 1GHz 相对与 Nyquist 采样速率来说, 也只有其 10%, 对与传统采样方法来说最少的 2 倍, 或者实际中要求原始带宽的 5 倍以上还是有相当效果的。

第五章 结束语

本文研究了压缩传感在超宽带通信中的应用,提出一种基于压缩传感理论框架下的超宽带实现方式。为解决超宽带的高频带和高带宽带来的数模转换和器件方面技术瓶颈提供了一条良好的解决途径。根据 D.Donoho 等人提出的压缩采样理论,采用对信号端进行稀疏控制的方式满足信号稀疏性,利用压缩传感框架进行超宽带通信。本文中超宽带信号使用的是基带信号,在信号端采用高斯脉冲波形脉冲位置 (PPM) 调制方式,控制脉冲个数使信号具有稀疏性,然后通过随机滤波器之后发送出去,在接收端直接采用只有 Nyquist 的 10%以下的速率直接采样,得到的数据利用正交匹配追踪算法还原出原始的信号。本文在 Matlab 中对该过程进行了模拟,成功实现用低于 Nyquist 频率的 10%以下的速率采样得到的数据完好还原原始信息。

本文把 CS 理论和 UWB 通信结合起来将传统采样方式的采样频率降低到 10%以下,效果明显。但同时也存在一些问题需要解决。

1) 本文采用的模拟过程未加入信道,需要采用最理想的状态也就是室内很少移动的状态,这种信道是确定的。对其进行通道估计,把信道加进来就才可以实现通过理想信道的情况;

2) 本文模拟采用的 UWB 信号是基带信号,虽然一部分 UWB 通信直接使用基带信号,但是直接的基带信号有可能对其他频率干扰较大,使用起来也不是很方便。

根据模拟中存在的问题后面还有很多的内容需要继续深入:

1) 加入对应的理想信道估计,实现理想室内少移动状态下的 UWB 通信;

2) 进一步对 UWB 室内信道进行研究,根据他多径大衰落性寻找新的模型解决室内大带宽 UWB 通信;

3) 基带信号使用起来不太灵活,频率搬移后重建效果会有所下降,需要进一步寻找解决办法。

参考文献

- [1] Donoho D L. Compressed sensing. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306
- [2] E J Candès and T Tao. Near optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies [J]. IEEE Trans. Info. Theory. 2006,52(12):5406-5425.
- [3] G Peyré. Best Basis compressed sensing[J].Lecture Notes in Computer Science, 2007, 44(85): 80-91.
- [4] V Temlyakov. Nonlinear Methods of Approximation[R] . IMI Research Reports , Dept of Mathematics , University of South Carolina. 2001. 01-09.
- [5] 王建英,尹忠科,张春梅. 信号与图像的稀疏分解及初步应用.西南交通大学出版社,2006.
- [6] D L Donoho, Y Tsaig. Extensions of compressed sensing [J].Signal Processing. 2006, 86(3): 533-548.
- [7] R Baraniuk. A lecture on compressive sensing [J].IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121.
- [8] Donoho D L,Y Tsaig,I Drori etc. Sparse solution of underdetermined linear equations by stagewise orthogonal matchingpursuit[R].Technical Report,2006.
- [9] E Candès, J Romberg, Terence Tao. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J].IEEE Trans.on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [10] M A T Figueiredo,R D Nowak,S J Wright. Gradient projection for sparse reconstruction :Application to compressed sensing and other inverse problems [J]. Journal of Selected Topics in Signal Processing: Special Issue on Convex Optimization Methods for Signal Processing, 2007, 1 (4): 586-598.
- [11] I Daubechies,M Defrise, C De Mol. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint[J].Comm.Pure Appl. Math., 2004, 57(11): 1413-1457.
- [12] A C Gilbert,S Guha,P Indyk,etc.Near optimal sparse Fourier representations via sampling [A].Proceedings of the Annual ACM Symposium on Theory of Computing [C]. Montreal, Que, Canada: Association for Computing Machinery. 2002. 152-161.
- [13] A C Gilbert,S Muthukrishnan, M J Strauss.Improved time bounds for nearoptimal sparse Fourier representation[A].Proceedings of SPIE, Wavelets XI[C].Bellingham WA:International Society for Optical Engineering.2005,5914:1-15.
- [14] A C Gilbert,M J Strauss,J A Tropp ,et al. One sketch for all:Fast algorithms for compressed sensing[A].Proceedings of the 39th Annual ACM Symposium on Theory of Computing[C].New York :Association for Computing Machiner.2007.237-246.
- [15] 方红,章权兵,韦穗.基于亚高斯随机投影的图像重建方法.计算机研究与发展, 2008, 45(8): 1402-1407
- [16] Maria-Gabriella Di Benedetto Guerino.超宽带无线电基础.电子工业出版社,2005.
- [17] M.Win and R. Scholtz, Ultra-Wide Bandwidth Time-hopping Spread Spectrum Impulse Radio for Wireless Multiple-access Communications, IEEE Trans. Commun., 2000 48:679-689.
- [18] X. Shen, M. Guizani, H. Chen, R. C. Qiu, and A. Molisch, Ultra-Wideband Wireless Communications, IEEE J. Select. Areas Commun.,Editorial on Special Issue on UWB, 2006,24.
- [19] J. Q. Zhang, UWB Impulse Radio Communication System Design and Prototyping. PhD Dissertation, Tennessee Tech University, Cookeville,TN, 2008, 110.
- [20] J. Tropp, M. Wakin, M. Duarte, D. Baron, and R. Baraniuk, Random Filters for Compressive Sampling and Reconstruction, in IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal

Processing, 2006,3.

[21] S.F. Cotter and B.D. Rao, Sparse channel estimation via matching pursuit with application to equalization. *IEEE Trans. on Communications*, 2002,50(3).

[22] Waheed U. Bajwa, Akbar Sayeed, and Robert Nowak, Compressed sensing of wireless channels in time, frequency, and space. *Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, California, October 2008.

[23] Waheed U. Bajwa, Akbar Sayeed, and Robert Nowak, Sparse multipath channels: Modeling and estimation. *IEEE Digital Signal Proc. Workshop*, Marco Island, Florida, January 2009.

[24] Alyson K. Fletcher, Sundeep Rangan, and Vivek K Goyal, On-Off Random Access Channels: A Compressed Sensing Framework. Submitted to *IEEE Trans. Information Theory* 2009.

[25] J. Meng, J. Ahmadi-Shokouh, H. Li, E. J. Charlson, Z. Han, S. Noghianian, E. Hossain, Sampling Rate Reduction for 60 GHz UWB Communication using Compressive Sensing. *Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers*, Monterey, California, November 2009.

[26] J Laska ,S Kirolos ,M Duarte etc. Theory and implementation of an analog-to-information converter using random demodulation[A]. *Proceedings of the IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS)* [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2007:1959-1962.

[27] D Takhar ,J Laska, M Wakin, etc. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression [A] .*Proceedings of SPIE*[C]. Bellingham WA: International Society for Optical Engineering. 2006:60-65.

[28] D Takhar, V Bansal, M Wakin, etc. A compressed sensing camera: New theory and an implementation using digital micromirrors [A]. *SPIE Electronic Imaging: Computational Imaging* [C]. San Jose. 2006.

[29] S Cha. illou, D Helal and C Cattaneo. Timed Simulator for UWB Communication Systems. *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*, 2002(5): 6-11.

[30] 王金龙, 王呈贵等. 无线超宽带(UWB)通信原理与应用. 北京: 人民邮电出版社, 2005.

[31] I Cuinas, M Sanchez. Building Material Characterization from Complex Transmissivity Measurements at 5.8GHz. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2000, 48(8): 1269-1271.

致 谢

再次回到校园，又一次的体会到了那久违了的氛围，重新开始对新的知识的追求。感受到了名校深厚的文化底蕴和强大的实力，感受到了导师那爱生如子的关怀，让我沉醉如斯，久久不能自拔。

短短的两年时间也许不能改变什么，但是却能使人重新找到久释的激情。非常感谢我的导师郭树旭教授，他带我走进了信息处理领域的大门，认识到了什么是压缩传感理论，指导我学到了很多很多的相关知识，得以将论文研究顺利的进行。

在论文相关的研究过程中于华楠师姐也给予了我很大的帮助，非常感谢她。

吉林大学电子科学与工程学院的各位老师，我的同学孙彪、齐志鹏、孔军辉、韩中良、宁刚等等在学习和生活中都给予了我不少的帮助在这里我对他们表示深深的谢意！

摘要

压缩传感在超宽带通信中的应用研究

信号的获取表达一般依据香农/奈奎斯特采样定理，采样频率至少要是信号带宽两倍，只有这样才能使表达信号没有失真。根据该准则要想获取宽带信号和高分辨率的图像，必须用很高的采样速率或者高分辨率来表达，这样存储下来的数据就有着非常大数量，采样后还得对原始采样数据进行压缩，不然会耗费很大的存储空间和传输带宽，造成资源的极大浪费。2004 年 D.Donoho 针对自然信号都具有稀疏性，提出了压缩采样理论，为解决上述问题奠定了坚实的理论基础。近些年来，超宽带技术，凭借它远优于传统传输技术的巨大优点，在各个方面引起了热切的关注。但是此项技术对于数模转换器件的要求非常高。现有工艺技术水平大大的制约了它的发展。CS 理论的诞生为低速率采样的可能性提供了理论基础，恰好为超宽带的高频带和高带宽带来的数模转换和器件方面技术瓶颈提供了一条良好的解决途径。

CS 理论的采样压缩过程和传统的方法大为不同，将采样和压缩两个过程合二为一，采样的同时就已经对信号进行了压缩，直接得到的就是压缩后的数据。或者从另一个角度来讲，压缩传感实际上是先对信号进行了压缩，然后利用合适的观测矩阵使它均匀的打散好使非适应性的低速率采样成为了可能。这样一来相当于以极高的效率使用传输信道。CS 理论是要对于一个 n 维信号 f ，通过远小于 n 的 m 个测量单元来表示，然后通过凸优化的方式重建原始信号。超宽带是近年兴起的一种无线通信技术。任意相对带宽高出 20% 或者绝对带宽大于 0.5GHz 的信号都可以称之为超宽带信号。超宽带通信是通俗的讲就是指其传输信号所占的带宽相对于其所属中心频率来说比较大。不太同于传统的无线电信号。最早在 20 世纪 90 年代由美国军方提出，随着技术的发展，逐渐的在民用多个方面得到了广泛的应用。由于它的大带宽带来了许多应用方面的优点，因此 UWB 可以应用在很多领域，如超宽带通讯、数据通信、无线传感网、无线定位、成像应用等等。

采样是超宽带通信的瓶颈。这里提出一种基于 CS 理论框架下的 UWB 实现

方式。我们同时证实了，要实现基于 3.1~10.6GHz 更或者 60GHz 的超宽带系统带宽需要的硬件，如果采用传统的采样技术，至少还要再花费很长的时间才能工业实现或者低成本实现。根据前面的 CS 理论知识我们提出一种基于 CS 理论的 UWB 系统，通过这种方式采样率至少可以降低到 Nyquist 的 10%以下。

本文这里仅考虑非常理想的情况，UWB 通信过程中是在室内的固定位置的情况下做实验。实验中我们假设信道估计的过程和通信的过程都是时不变的。为了简化实验，我们先不考虑信道，加入信道的话只要增加一步运算就可以实现。现在我们将实验的重点放在仅仅采用 Nyquist 频率 5%及以下速率的 A/D 转换器，观测矩阵减小一半以上的这种情况下是否能够较好的重建原始信号。模拟证实：1)将压缩传感理论应用在超宽带通信中，突破 Nyquist 采样定律确实是可行的；2) 使用随机滤波的方式实现压缩传感是可行的，而且可以大大加速运算；3) 随机滤波器的选择很重要，不同的随机分布会对重建原始信号的概率有着较大的影响；4) 采样率的提高对于重建原始信号概率的提高占有很大的作用；5) 滤波器的长度对重建概率的提高也能起到促进作用，但是没有采样速率提高起到的作用明显。模拟中我们做到以 1GHz 的低采样速率获得的信息高概率重建原始信号。将 Nyquist 采样速率的 2 倍以上降低到其 10%，效果显著。

本文把 CS 理论和 UWB 通信结合起来将传统采样方式的采样频率降低到 10%以下，效果明显。但是还要做得工作还有不少：1) 本文采用的模拟的过程未加入信道，需要采用最理想的状态也就是室内很少移动的状态，这种信道是确定的。对其进行通道估计加入过程中就才可以实现通过理想信道的情况。以后还要进一步对 UWB 室内信道进行研究，根据它多径大衰落性寻找新的模型解决室内大带宽 UWB 通信；2) 本文模拟采用的 UWB 信号是基带信号，虽然一部分 UWB 通信直接使用基带信号，但是直接的基带信号有可能对其他频率干扰较大，使用起来也不是很方便。频率搬移后重建效果会有所下降，需要进一步寻找解决办法。

关键词：

压缩传感，超宽带通信，稀疏分解，观测矩阵，随机滤波

Abstract

Study of Compressive Sensing Based Ultra-wideband Communication

Shannon / Nyquist sampling theorem provides for the reduction of the original signal without distortion if the sampling frequency is at least twice of the signal bandwidth. According to the criteria order to obtain broadband signal and high-resolution images requires very high sampling rate or resolution for expressing, which store down the data with very large number. After sampling the original sample data have to be compressed, otherwise it will spend a great storage space and transmission bandwidth, causing great waste of resources. D. Donoho proposed compressed sampling theory based on the sparse property of natural signals in 2004, which provides a solid theoretical basis to overcome this problem. In recent years, ultra-wideband technology comes to alive. It has aroused keen concern from all aspects because of its great advantages relative to the traditional transmission technology. However, this technology requires the high performance of the DAC and the existed technology restricts its development greatly. The appearance of CS theory provides a theoretical basis for sampling with low rate, and gives a good solution for the technical bottleneck of the ultra-wideband high-frequency band and high-bandwidth digital-analog conversion.

The compression process of the CS theory is very different from that of the conventional sampling method and it combines the sampling and compression processes, which compresses the signal during the sampling process, thus directly obtains the compressed data. On the other hand, compressed sensing firstly compresses the signal, and then uses the appropriate observation matrix to make it uniformly dispersed so that non-adaptive sampling with low rate is possible. All of these result in the highly and efficiently using of the transmission channel. CS theory is to express a n -dimensional signal f by m number of measurement units whose dimension is much less than that of the former one, and then rebuild the original signal by convex optimization method. UWB is a wireless communication technology developed in recent years. Signal whose any relative bandwidth with 20% higher than the common one or absolute bandwidth with more than 0.5GHz bandwidth can be

called ultra-wideband signals. UWB communication means the transmission signal bandwidth is greater than the respective center frequency, which differs from the traditional ratio signal. UWB was first proposed by the U.S. Military in 90 years during the 20th century, which has been widely used in many civilian aspects with the development of the technology. Because of its large bandwidth, UWB can be applied in many fields, such as ultra-wideband communications, data communications, wireless sensor networks, wireless location, imaging applications and so on.

Sampling is the bottleneck of UWB communications. CS theory was presented here based on the framework of UWB implementation. We also confirmed that it still have to take a long time to complete the hardware for the 3.1 ~ 10.6GHz or 60GHz bandwidth of UWB system with low cost by traditional sampling techniques. According to the previous CS theory, we propose a UWB system, which can reduce the sampling rate below the 10% of Nyquist rate.

Here we consider the simplest situation, UWB communication process is performed at a fixed location in the room. We assume that the channel estimation process and communication process are time-invariant. To simplify testing, we do not consider the channel at first, Because the computing can be achieved by adding additional step when joining the channel. Now we will focus on the condition, which utilized A/D converter with 5% Nyquist frequency or even lower and reduction of more than half of the observation matrix, whether can reconstruct the original signal well or not. Simulation confirmed that: 1) Application of compressed sensing theory in ultra-wideband communication, breaking the Nyquist sampling law is indeed feasible; 2) Using a random filter means to achieve the compression sensing is feasible and can greatly accelerate the computation rate; 3) The selection of random filter is very important, and different random distribution has a great effect on the probability of reconstructing the original signal; 4) Sampling rate increasement pays a important role in increasing the probability of reconstructing the original signal; 5) The length of the filter also influences on increasing the probability of reconstructing signal but not obviously relative to sampling rate. We use 1GHz low sampling rate to reconstruct the original signal with high probability, which reduces the Nyquist sampling rate from more than 2 times to around 10%.

This thesis reduces the sampling rate of traditional sampling methods to 10% of the Nyquist sampling rate based on combining the CS theory and UWB communication, and the results are obvious. But also there are much work remaining

done: 1) The simulation process did not introduce channel, so it needs to adopt ideal state which means very little movement in the room and this channel is determined. We still have to further study the UWB indoor channel, according to its multi-path fading for finding great new models to achieve large bandwidth of UWB indoor communications; 2) The UWB simulating signal used in this thesis is baseband signal, although part of UWB communication directly use the baseband signals, a direct baseband signal may significantly interfere other frequency signals and it is not convenient to use. We have worded out that the frequency shift can result in the decrease of reconstructing effect, so it is necessary to find other methods to effectively solve such problems.

Key words:

compressive sensing, ultra-wideband communications, sparse decomposition, observation matrix, random filtering