

基于等效采样的高速啁啾信号恢复

冯心如,景宁,银子燕

(中北大学 信息与通信工程学院,太原 030051)

摘要: 在压缩感知原理的基础上,利用分数阶傅里叶变换和等效时间采样构造观测矩阵,对观测过程进行稀疏表达,建立符合压缩感知原理的高频观测方程,并对其进行求解,最终实现对原始信号的重建。利用比奈奎斯特取样速率更短的特定时间取样,可以实现对线性调频信号的高精度重构;而当取样采用不等间隔取样,在时频范围内,取样的时频范围不再是固定的,但会因原信号中的非零点出现能量泄漏而造成大量无关扰动。等效时间采样使得频谱不再是规律性搬移,而是一小部分胡乱地搬移,频率泄漏均匀地分布在整个频域,因而数值都比较小,使恢复过程误差更小。仿真实验结果表明,所提方法在采样点个数为 17 时,重构成功率高达 99.62%。

关键词: 分数阶傅里叶变换;等效时间采样;压缩感知;啁啾信号

中图分类号: TN98

文献标识码: A

High-speed Chirp Signal Recovery Based on Equivalent Sampling

Feng Xinru, Jing Ning, Yin Ziyan

(College of Information and Communication Engineering, North Central University, Taiyuan 030051, China)

Abstract: This project proposes to construct an observation matrix based on the principle of compressive sensing, using fractional Fourier transform and equivalent time sampling to perform a sparse representation of the observation process, to establish a high frequency observation equation in accordance with the principle of compressive sensing, and to solve it, and finally to realise the reconstruction of the original signal. High-precision reconstruction of linear FM signals can be achieved using time-specific sampling at shorter rates than Nyquist sampling. When sampling is done at unequal intervals, the time-frequency range sampled is no longer fixed in the time-frequency range, but results in a large amount of extraneous perturbation due to energy leakage from non-zero points in the original signal. Equivalent time sampling makes the spectrum no longer move regularly, but a small part of it moves haphazardly, and the frequency leakage is uniformly distributed throughout the frequency domain, thus the leakage values are all smaller, making the recovery process less error-prone. The simulation experiment results show that the proposed method achieves a reconstructed power of 99.62% at 17 sampling points.

Keywords: fractional Fourier transform; equivalent time sampling; compressive sensing; chirp signal

0 引言

LFM 信号(又称线性调频信号)是一类具有时变特性的信号,在声呐、通信、激光等传统领域有着广泛的应用^[1]。近几年来,该方法已被广泛地用于光子学和微波光子学的交叉研究,以及传统光子学和信息处理的交叉研究。线性调频信号的采集和恢复是光学测量等领域共同面临的基本而普遍的问题,对其进行深入研究,无论是在声呐、雷达、激光等传统领域,还是在新兴的光学交叉领域,都有着重要的理论和现实意义^[2]。针对宽带线性调频信号,其频带可达数十、数百 MHz,根据奈奎斯特抽样原理,其抽样速率必须大于最大频带宽度的 2 倍或更多才能实现信号的准确重建^[3]。高速采样给数据收集系统带来了巨大挑战,既要消除海量的冗余信息,又要通过压缩编

码来缩短数据的传输、存储与处理时间,同时也会造成巨大的资源浪费。若能在信号取样时仅获取少数几个含有信号所有有用信息的压缩数据,不但可降低取样率、减小数据量,还可以降低后期的传输、存储及处理费用。

传统的实时采集技术要求模/数转换器(ADC)以 2 倍于信号最高频率的转换率进行采集,这对时域非常狭窄的信号提出了很高的要求,给硬件设计和实现带来了困难^[4]。但利用等效时间采样技术可以在奈奎斯特采样速率下,在多个不同周期内对信号进行多个采样,并重建出相应的波形,进而实现高等效采样速率。本项目提出一种基于时间-频率关系的分数傅里叶变换(FTT)算法,将分数 FTT 转换为时间-频率平面上的旋转角变换^[5],实现了旋转角在时间-频率空间上的连续映射,从而实现对旋转角的连续映射。压缩感知将信号映射到具有稀疏表示的

变换域,再利用不依赖于变换基的观测矩阵将高维信号从变换域投射到低维空间^[6-7]。在此基础上,利用最优解的思想从较少的观测数据中还原出原始的观测信号,从而有效降低系统的资源消耗。

1 工作原理

压缩感知的一个重要条件是信号的稀疏特性,而在特定的变换领域,信号的稀疏特性较为容易实现。因为傅里叶变换所构造的基函数是一个复杂的线性 FM,所以在分数域上,Chirp 信号也表现出很好的稀疏性,满足了压缩感知的需求。适当的观测矩阵是压缩传感理论的另一个重要先决条件。另外,采用合适的重构方法也是本文所要解决的问题之一。

1.1 压缩感知理论

压缩感知通过对信号进行高精度、高质量的线性观测,并根据观测数据的稀疏特性对其进行重构^[8]。这一理论确保了观察到的信号是随机的,真实的信息不会丢失,采用概率恢复法进行信号重建^[9]。其中,信号的稀疏表示、观测矩阵以及重建算法是最基本的 3 个方面。压缩感知原理图如图 1 所示。

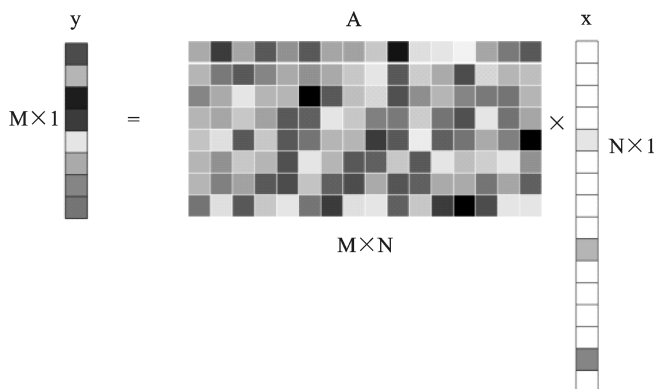


图 1 压缩感知原理图

信号的稀疏表达,即利用分数阶傅里叶变换等正交变换使信号在一定区域内具有良好的稀疏特性。在变化域上,大多数变化域上的数值都是 0 或者近似于 0,非 0 的仅为极少数。而观测矩阵,就是通过对信号的随机抽样来获取更多的观察数据。为了保证观测矩阵的有效性,需要满足约束等距条件(RIP),也就是每 M 个列向量构成的矩阵均为非奇异矩阵^[10]。而重建算法通过高效算法从极少的观测数据中最大限度地还原原始信号,其实质是在满足稀疏性的前提下解决了范数极小化问题。

1.2 信号的稀疏表达

在压缩感知理论中,信号的稀疏表达是一个关键环节。作为一种广义傅里叶变换,分数阶傅里叶变换能够在

时间-频率平面上对信号作任何角度的转动,进而对信号在时间-频率平面上的特性进行分析,是一种基本表征方式^[11]。它的基函数是由一系列 LFM 信号组成的,因而对 LFM 信号的处理具有很好的适应性。

正弦信号经傅里叶变换后,在频率域内呈现出脉冲函数特征,而通过分数阶傅里叶变换后,则可在分数阶傅里叶域内呈现脉冲函数特征。对于具有信号模型 $x(t) = \exp[j\pi(2f_0 t + kt^2)]$ 的相位信号,采用具有 p(转动角度 $\alpha = p\pi/2$) 阶次的分数阶傅里叶变换,可以用下面的步骤来解决:

$$\begin{aligned} X_p(u) &= \int_{-\infty}^{+\infty} K_p(u, t) e^{j\pi(2f_0 t + kt^2)} dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{1 - j\cot\alpha} e^{j\pi \langle u^2 \cot\alpha - 2ut\cot\alpha + t^2 \cot\alpha \rangle} e^{j\pi \langle 2f_0 t + kt^2 \rangle} dt \\ &= \sqrt{1 - j\cot\alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\pi u^2 \cot\alpha - j2\pi ut\cot\alpha + j\pi t^2 \cot\alpha} e^{j2\pi f_0 t + j\pi kt^2} dt \end{aligned} \quad (1)$$

本项目拟将模拟的 Chirp 信号作分数阶傅里叶变换,并将变换阶次作为自变量,研究其在分数阶傅里叶域中的能量集聚特征。当转换阶次达到一定的最佳阶(也就是脉冲函数与能量中心的位置相对应)时,小波在分数阶傅里叶频段表现出显著的脉冲特征,此最佳阶数就是所谓的分数阶傅里叶变换的最佳阶数。聚合性质随最优阶的增加而增加,随距离最优阶的增加而减小^[12]。Chirp 信号连续阶次下的分数阶傅里叶变换如图 2 所示。

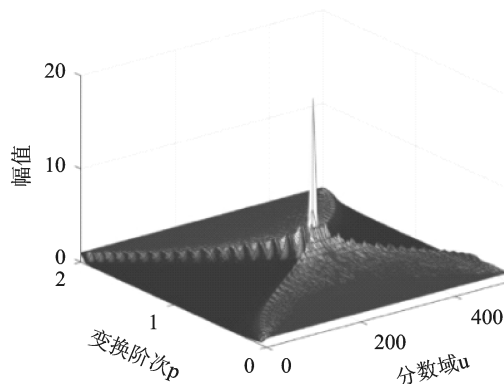


图 2 Chirp 信号连续阶次下的分数阶傅里叶变换

若线性调频信号的调频与特定基底的调频重合,则会构成一个 delta-function,这时基底信号会表现出很好的时频聚合特征。在信号压缩感知中,寻找与能量聚合性质相适应的转换阶 p,进而确定对应的 FRFT 基元,构造具有良好稀疏表达能力的正交集词典,是实现信号稀疏表达的关键。因此,信号压缩感知的第一个要求就得到了满足。

2 信号采集及恢复

2.1 等效时间采样

等效时间采样方法原理如图 3 所示,其原理可等效为

在原始信号 $f(t)$ 上采样 $M=T_s/\Delta t$ 个数据,其中 $f(t)$ 为周期是 T 的原始信号, Δt 为固定的采样步进时间, $T_s=T+\Delta t$ 为等效采样周期。该方法通过周期为 T_s 的采样脉冲 $p(t)$ 在采样信号的多个周期内采样多个数据:第一次采样脉冲时间为 Δt ,采样后获取第一个采样数据 $y_1=p(\Delta t)f(\Delta t)$;第二次采样脉冲时间为 $T+2\Delta t$,采样后获取第二个采样数据 $y_2=p(T+2\Delta t)f(T+2\Delta t)$;第 M 次采样脉冲时间为 $(M-1)T+M\Delta t$,采样后获取第 M 个数据 $y_M=p((M-1)T+M\Delta t)f((M-1)T+M\Delta t)$ 。在等效时间采样中,按照时间顺序逐个获取采样点,并在每次触发后在采样脉冲周期时间上递增一个微小增量 Δt ,以获取足够数量的采样点。最终,这些采样点按时间排序可以恢复和重构出原始信号。

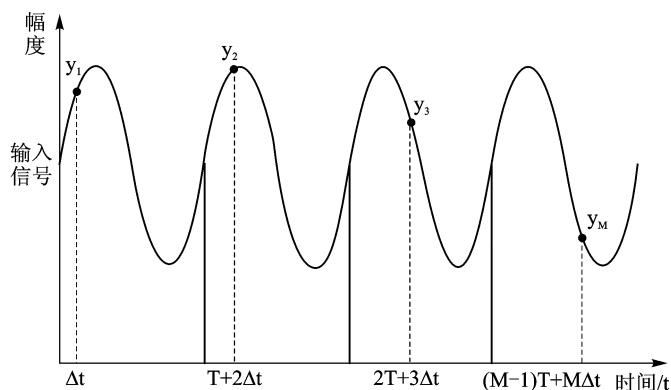


图3 等效时间采样原理图

啁啾信号时域波形如图4所示,利用等效时间采样对啁啾信号进行欠采样,采样时间为前一次采样后经过一个固定的周期再加上一个逐次增大的时间间隔,即 $q(i)=q(i-1)+T+dq*(i-1)$ 。其中, $q(i)$ 表示采样时间, $q(i-1)$ 表示前一次采样时间, T 表示固定的周期, $dq*(i-1)$ 表示逐次增大的时间间隔,因而采样时间间隔在采样周期中的分布是不均匀的,最后得到输出采样点的横纵坐标,得到观测值 $y \in M \times 1$,实现超高频啁啾信号的降维。其中, M 表示观测向量 y 的行数。

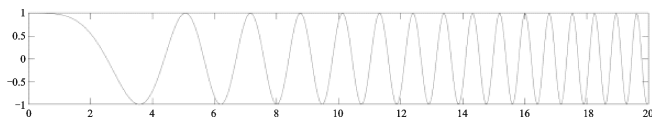


图4 啁啾信号时域波形

Chirp 信号经过等效时间采样后的采样点不均匀地分布在图中,实现远低于奈奎斯特采样率的取样,如图5所示。

2.2 构造测量矩阵

将 Chirp 信号进行等效时间采样,每产生一次触发进行一次信号的取样,触发序列相对于固定的采样周期 T

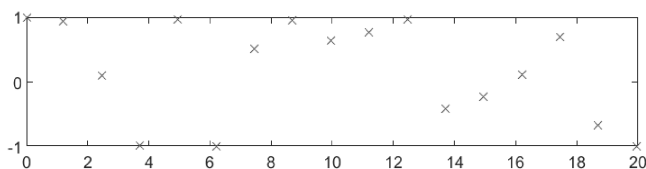


图5 啁啾信号欠采样

的起点,依次增加 Δt 的精密时延,测量矩阵 A 为以多个值为1的时间间隔逐渐增加 Δt 的矩阵,如图6所示。由于 A 与 Ψ 不相关,因此测量矩阵 A 满足 RIP 性质。

2.3 信号恢复

Chirp 信号经过分数阶傅里叶变换后,满足压缩感知所需要的稀疏性条件;经过欠采样后,信号中的重要信息被保留下来,以便进行信号重构。尽管观测向量 y 的维数远小于原始超高频信号 x ,但由于测量矩阵 A 遵循稀疏表达条件(RIP)和不相干性质,信号仍然可以有效地重构。由于测量矩阵 A 满足 RIP 和不相干性质,通过求解最优范数问题来求解 $y=Ax$,从而得到原超高频信号 x 。

	$\llbracket \Delta t \rrbracket$					
1st	1	0	0	0	0	0
2st	0	1	0	0	0	0
3st	0	0	1	0	0	0
4st	0	0	0	1	0	0
...	0	0	0	0	...	0
$q(i)$						

图6 测量矩阵

在此基础上,提出了一种基于广义正交矩阵法的信号重建方法,该方法具有较好的收敛性和较低的迭代次数。图7显示了信号重建的结果,在时间域中,除了振幅稍有不同外,此结果与原来的信号处于同一位置。

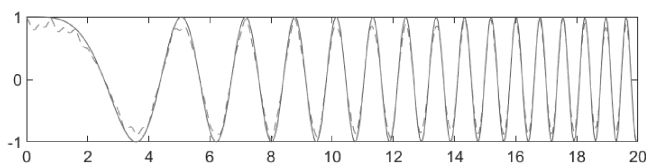


图7 啁啾信号恢复

3 结语

本文所提方法通过等效时间采样及分数阶傅里叶变换矩阵构建满足压缩感知理论的啁啾信号采集方程,然后利用广义正交匹配追踪算法对方程进行求解。实验结果表明,所提方法可以对信号进行采集并有效恢复,重构成功率高达 99.62%。

参考文献

- [1] Nasu H. Compressive Sensing Detection of RF Signals by All-Optically Generated Binary Random Patterns[C]//2019 IEEE 2nd British and Irish Conference on Optics and Photonics (BI-COP). IEEE, 2019.

- [2] YongJun Z, Cong Z, CunJun L I, et al. Fractional Fourier Transform of Ultrasonic Chirp Signal for Range Measurement[C]//The Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference, 2015.
- [3] 关博. 基于稀疏重构及动态性分析的宽带压缩频谱感知算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [4] 高磊, 宿绍莹, 陈曾平. 宽带雷达 Chirp 回波的正交稀疏表示及其在压缩感知中的应用[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2720 - 2726.
- [5] M Arif, D M J Cowell, S Freear. Pulse Compression of Harmonic Chirp Signals Using the Fractional Fourier Transform [J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2010, 36(6).
- [6] 周鸿博. 基于脉冲色散处理的光子学压缩感知关键技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [7] 王硕, 郭勇, 杨立东. 分数阶傅里叶变换域的调频信号稀疏性研究[J]. 光电工程, 2020, 47(11): 40 - 47.
- [8] 齐佩汉, 李冰, 谢爱平, 等. 欠采样跳频通信信号深度学习重构方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2022, 49(4): 1 - 7.
- [9] 宋维斌, 张圣儒, 邓忆秋, 等. 分数阶傅里叶变换域稀疏带限信号的模拟信息转换[J]. 光电工程, 2018, 45(6): 50 - 58.
- [10] 仇兆场, 陈蓉, 汪一鸣. 基于 FRFT 的线性调频信号欠采样快速检测方法[J]. 电子学报, 2012, 40(11): 2165 - 2170.
- [11] Liu B. Frequency estimation of chirp signals based on fractional fourier transform combined with Otsu's method[J]. Optik: Zeitschrift für Licht - und Elektronenoptik, = Journal for Light and Electronoptics, 2021, 240(1).
- [12] Su H, Bao Q, Chen Z. ADMM - Net: A Deep Learning Approach for Parameter Estimation of Chirp Signals under Sub - Nyquist Sampling[J]. IEEE Access, 2020(99): 1.
- [13] 吴棋. 基于压缩感知的相移同轴分数阶傅里叶变换数字全息[J]. 信息通信, 2017(7): 17 - 21.

冯心如、银子燕(硕士研究生), 主要研究方向为信号获取与处理技术; 景宁(副教授), 主要研究方向为光通信技术。通信作者: 冯心如, 1461413004@qq.com。

(责任编辑: 薛士然 收稿日期: 2023-05-31)

- 36 [3] 吉斌, 昌力, 朱丽叶, 等. 区块链系统节点私钥泄露的电力数据防篡改方法与验证机制设计[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 87 - 94.
- [4] 李炜, 黄倩. 基于区块链技术的机器人运行数据抗篡改存储方法[J]. 科技通报, 2021, 37(11): 65 - 68.
- [5] 杨修玮. 基于数据挖掘的网络隐私数据防篡改方法研究[J]. 信息技术与信息化, 2021(12): 112 - 114.
- [6] 刘淑艳, 李丽芬. 基于信息隐藏的无线共享网络数据防篡改方法[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 265 - 270.
- [7] 李克楠, 邱海彬. 基于 ECC 算法的嵌入式 Linux 系统 ELF 可执行文件防篡改方法[J]. 信息技术与信息化, 2022(7): 144 - 147.
- [8] 李金讯, 郭娜, 林树鸿, 等. 基于多重图像隐藏防伪标识公文防篡改的新方法研究[J]. 电力大数据, 2021, 24(9): 1 - 8.
- [9] 张利华, 黄阳, 王欣怡, 等. 基于区块链的精准扶贫数据保护方案[J]. 应用科学学报, 2021, 39(1): 135 - 150.
- [10] 刘峰, 赵俊峰. 基于区块链的云存储数据完整性验证方案[J]. 应用科学学报, 2021, 39(1): 164 - 173.
- [11] 李晓明, 黄慧, 殷毅, 等. 基于区块链的医疗临床数据防篡改机制及篡改攻击分析[J]. 高技术通讯, 2021, 31(2): 141 - 147.
- [12] 孙传恒, 于华竟, 罗娜, 等. 基于智能合约的果蔬区块链溯源数据存储方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 361 - 370.
- [13] 李姝, 赵培培, 于金刚, 等. 基于区块链的数据交易平台的研究与设计[J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(5): 1109 - 1114.
- [14] 许金. 煤矿安全监控系统数据防篡改研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(2): 116 - 119.
- [15] 方晨, 郭渊博, 王一丰, 等. 基于区块链和联邦学习的边缘计算隐私保护方法[J]. 通信学报, 2021, 42(11): 28 - 40.

李斌(高级工程师), 主要研究方向为大数据技术、人工智能技术、电力信息系统智能化运维及网络安全等; 刘思尧(高级工程师), 主要研究方向为物联网、人工智能技术、电力信息系统智能化运维及网络安全等; 王敏(工程师), 主要研究方向为大数据技术、云计算技术、数据库、智能运维技术等; 秦振威(助理工程师), 主要研究方向为信息通信信息化系统。通信作者: 李斌, nailun23258257256@163.com。

(责任编辑: 薛士然 收稿日期: 2023-05-15)

空中客车公司携手意法半导体助力飞行电动化

全球航空航天业先驱空中客车公司(Airbus, 以下简称空客)和服务多重电子应用领域、全球排名前列的半导体公司意法半导体(STMicroelectronics, 以下简称 ST)最近签署了一项功率电子技术研发合作协议, 以促进功率电子器件更高效、更轻量化, 这对于未来的混动飞机和纯电动城市飞行器发展至关重要。

在签署该合作协议前, 双方已充分评估了宽禁带半导体材料给飞机电动化带来的种种好处。与硅等传统半导体材料相比, 碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)等宽禁带半导体的电气性能更优异, 有助于开发更小、更轻、更高效的高性能电子器件和系统, 尤其适合那些需要高功率、高频或高温开关操作的应用领域。

该合作项目主要围绕为空客开发航空级 SiC 和 GaN 功率器件、封装和模块展开。两家公司将在电机控制单元、高低压电源转换器、无线电能传输系统等实物演示装置上进行高级研究测试, 评估功率组件的性能。