

文章编号:1001-9081(2016)02-0492-03

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.02.0492

非等间隔采样信号傅里叶频谱分析方法

方建超,毛雪松*

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 武汉 430081)

(* 通信作者电子邮箱 xsmao@wust.edu.cn)

摘要:针对伪随机(PN)码调制的多普勒激光雷达中固有的对外差信号不能等间隔采样的问题,提出一种新的非均匀采样信号的离散傅里叶变换(DFT)方法。首先,给出距离速度同步测量多普勒激光雷达系统模型,指出对外差信号不能等间隔采样的原因;然后,通过理论推导,提出一种新的非均匀采样信号的频谱分析方法;最后,通过仿真验证该方法可用于分析非等间隔采样信号的频谱。结果表明,在道路运动目标产生的多普勒频率范围内,接收信号信噪比(SNR)为0 dB的情况下,该方法仍可有效分析出不等间隔采样多普勒信号的频率。

关键词:非等间隔采样;快速傅里叶变换;信号处理;频谱分析;多普勒激光雷达;道路目标感知

中图分类号: TN911.6 文献标志码:A

Fourier spectrum analysis for non-uniform sampled signals

FANG Jianchao, MAO Xuesong*

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China)

Abstract: For dealing with the problem of being unable to sample beat signals with equal interval that is inherent in the Pseudo random Noise (PN) code modulated Doppler laser radar, a new Discrete Fourier Transform (DFT) method which applies to non-uniform sampling data was proposed. Firstly, system model of Doppler laser radar for simultaneously measuring range and speed was provided, and the reason of being unable to sample beat signals with equal interval was pointed out. Then, by theoretical deducing, a new spectrum analysis method was proposed for processing non-uniform sampling signals. Finally, simulations were performed to verify the feasibility of applying the proposed method to non-uniform sampling data. As a result, within Doppler frequency range which is created by moving targets in roads, the method can obtain the frequency of non-uniform sampling Doppler signals efficiently even when Signal-to-Noise Ratio (SNR) is low to 0 dB.

Key words: non-uniform sampling; Fast Fourier Transform (FFT); signal processing; spectrum analysis; Doppler laser radar; road target sensing

0 引言

快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法在数字信号处理领域占有极为重要的地位,它是到目前为止信号频谱分析的重要手段,可以将 N 点数据的离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的计算量从 $O(N^2)$ 压缩到 $O(N \log N)$,使得在电子计算机上分析大数据量的信号频谱成为可能^[1]。但是,FFT算法的执行要求其数据分布局限于均匀分布的标准网格上,这一点在实际应用中通常难以满足。非标准采样快速傅里叶变换算法在实际中有着广泛的应用,例如,因电子时钟的不稳引起的非均匀采样、电子计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)图像的重建^[2]、雷达信号处理^[3]等领域中都存在对信号不等间隔采样的问题。

目前,车载激光雷达都只测量目标距离而不测量目标速度。文献[4–5]提出使用连续波的方式实现激光雷达同步测量目标距离和速度,但是工作于连续波模式下的激光器发射峰值功率不可能太高,特别是在使用半导体激光器的情况下,峰值发射功率只有几毫瓦。由于道路目标的多样性,在发射峰值功率很低的情况下,探测低反射率的目标时极有可能达到激光雷达的理论探测极限。因此,实用的车载激光雷达

都采用脉冲式的方法测量目标的距离。为了保证发射脉冲序列在光频上的相关性,文献[6–7]使用随机码对工作于连续模式的激光器作幅度调制,然后使用光纤放大器对调制后的脉冲信号放大,使发射峰值功率达到100 W左右,实现激光雷达的脉冲式探测方法。这种激光雷达的反射回波与本地连续的参考光信号混频后得到的是不连续的外差信号,因此无法实现对外差信号的等间隔采样。

已经存在的非等间隔采样傅里叶频谱分析方法包括:利用插值法^[8–9]、线性正则变换^[10]、多项式估值^[11]和最小二乘法^[12]等信号重构法来实现非等间隔采样信号的频谱分析方法。这些方法的特点是对信号的信噪比要求较高,如果信号淹没在噪声中,算法并不可靠。雷达回波通常很微弱,一般被淹没在接收器的噪声中,因此无法通过插值法或者过零检测等方法实现频谱的分析。在信噪比较低的情形下,弃点法(Throw Away Method, TAM)^[13]、自相关法^[14]等可以处理信噪比较低情形的非等间隔信号频谱分析,但TAM和自相关法都是处理特定时间间隔信号的频谱分析方法,对伪随机(Pseudo random Noise, PN)码调制的多普勒信号并不适用,而且TAM对初始相位敏感,在雷达信号处理中更难以实用。统计平均法要求有大量的数据,这必然会降低激光雷达的实

收稿日期:2015-09-01;修回日期:2015-09-28。 基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2014CFB815)。

作者简介:方建超(1991–),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要研究方向:雷达信号处理;毛雪松(1975–),男,江苏盐城人,教授,博士,主要研究方向:雷达信号处理、非线性光纤光学。

时性。本文针对车载激光雷达的具体应用,推导出一种分析非等间隔采样信号频谱的方法,并将该方法应用到激光雷达外差信号的频谱分析中,能取得较好的效果。

1 问题描述

车载多普勒激光雷达的原理框图如图1所示。激光器发出连续光,经过外部光调制器对光幅度调制后,由准直镜头投射到目标。目标反射信号由接收镜头采集并耦合到光纤中,然后由光分离器将反射回波分为两路,其中一路照射到光电转换器PD2上,另一路与参考信号在光耦合器中混频并照射到光电转换器PD1上。由于光电转换器是对光强度敏感的器件,其输出即为反射回波与本地参考信号的外差信号。

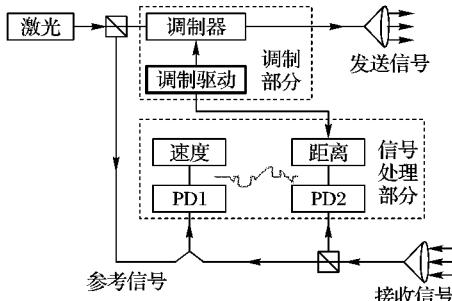


图1 距离速度同步测量激光雷达框图

为高精度探测目标距离,需增大发射信号的带宽。本文使用伪随机码调制激光雷达发射信号的强度实现扩频,提高距离分辨率。在接收端,由PD2输出的电信号与调制码作相关运算,找到相关峰值对应的时间点即可测量出激光从发射到接收的飞行时间,从而测量出目标的距离。

如果发射光是未经调制的连续光,PD1输出的信号将是连续的正弦波,其频率对应于由目标运动速度而产生的多普勒信号的频率。但是,当发射信号是由伪随机码调制后的信号时,PD1输出的信号将变成如图2所示的不连续的正弦波,其中调制码“1”时隙内仍保持正弦波的形状,调制码“0”时隙内的信号将趋于零电平。由于伪随机码的随机性,即“0”可以存在于任意时刻,无论使用何种采样率,都无法获得对多普勒信号的等间隔采样。直接对采样数据使用等间隔采样的FFT算法,不能稳定获得信号频谱的峰值,即不能可靠地测量出目标的速度。图2中的时延对应于激光的飞行时间。

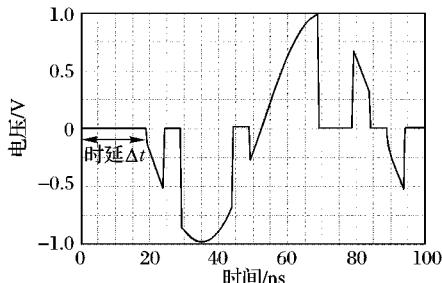


图2 伪随机码调制的多普勒激光雷达输出外差信号

在通信系统中,接收信号的信噪比一般在20 dB以上,可以通过包络检波的方式恢复码“0”所在时间位置电平。但是在雷达系统中,由于接收到的回波信号经过物体反射、空间散射、大气吸收等,到达接收器的回波信号非常微弱,通常淹没在接收机的热噪声中,接收信号的信噪比一般在0 dB以下。码“1”所在位置提供的信号本身不可靠,因此通过包络检波器后得到的数据并不能代表信号本身的包络,即无法通过包

络检波的方式获得原始的连续正弦波形式的多普勒信号。同样的原因,无法使用插值的方法,无论是sinc函数插值还是B样条插值,对淹没在噪声中的信号作频率分析工作。为了分析出淹没在噪声中的外差信号的频率,有必要设计新的方法,不使用码“1”处的幅值进行估值。

2 非等间隔采样信号频谱分析方法

根据傅里叶变换的定义,连续信号 $f(t)$ 的傅里叶变换为:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

为了能够使用计算机分析连续信号的频谱,必须对连续时间信号加窗,假设窗函数为 $[0, T]$ 内的矩形,高度为1,则式(1)变换为:

$$F(\omega) = \int_0^T f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

在时间轴上共采样 N 个数据点,所在的时间位置分别为 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$,这 N 个数据点之间的间隔不等,分别记为 $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_{N-2}$,式(2)的积分式可转换为求和式:

$$F(\omega) = \sum_{i=0}^{N-2} f(t_i) e^{-j\omega t_i} \Delta T_i \quad (3)$$

假设采样数据之间的间隔相等,即 $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \dots = \Delta T_{N-2} = \Delta T$,式(3)可转换为:

$$F(\omega) = \Delta T \sum_{i=0}^{N-2} f(t_i) e^{-j\omega t_i} = \frac{1}{F_s} \sum_{i=0}^{N-2} f(t_i) e^{-j\omega t_i} \quad (4)$$

F_s 为信号的采样率。

在采样数据等间隔的情况下,离散傅里叶变换的定义为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (5)$$

k 为数字域频率。

比较式(4)和式(5),得到

$$\begin{cases} t_i \leftrightarrow n \\ \omega \leftrightarrow \frac{2\pi k}{N} \end{cases} \quad (6)$$

其中: \leftrightarrow 表示对应关系,可以通过数字域时间和频率计算出模拟域的时间和频率。在等间隔采样的情况下,使用FFT分析连续信号的频谱只需按式(6)作相应转换即可。

如果信号的采样间隔不相等,为了使用FFT分析信号的频谱,需要对式(3)作适当的变换,使其具有式(4)的形式:

$$F(\omega) = \sum_{i=0}^{N-2} f(t_i) \Delta T_i e^{-j\omega t_i} = \sum_{i=0}^{N-2} \tilde{f}(t_i) e^{-j\omega t_i} \quad (7)$$

其中 $\tilde{f}(t_i) = f(t_i) \Delta T_i$ 。将原外差信号每个码“1”时隙内信号的幅度乘以这些码到下一个码“1”的间隔称为对接收到的外差信号作幅度修正。作了幅度修正以后,对每个码“1”时隙采样一次,并对得到的数据直接使用FFT就可求出多普勒信号的频谱。在从数字频率到模拟频率变换过程中,采样率为码元的宽度,而不是随机采样率。

为了对伪随机码调制的激光雷达接收外差信号作频谱分析,需要知道发射脉冲之间的间隔。这些间隔可以在伪随机码生成的阶段由计数器对其进行统计并保存在存储器中。但是,由于接收信号随机时延的存在,无法预测外差信号中第一个脉冲所在的位置,所以必须借助于由PD2输出信号计算获得的距离信息找出多普勒信号的头位置,然后根据脉冲间隔确定各个多普勒信号的数据点,确保采样数据点是受噪声干扰的多普勒信号,而不是纯噪声。由于PD1与PD2之间的时延

是固定的,取决于两者之间光纤的长度,显然通过 PD2 测得的距离确定多普勒信号的头位置具有可行性。

3 仿真结果与分析

由于距离测量部分只是计算 PD2 输出信号与调制码的相关函数,并由相关函数峰值位置确定激光飞行时间,原理上不存在问题,所以仅对速度测量部分进行仿真,通过验证非等间隔采样信号频谱解析的可行性确定距离测量的同时测量速度的可行性。在激光雷达发射信号波长为 1 550 nm 的情况下,1 m/s 的目标速度(对应于行人的步行速度)会产生频率为 1.29 MHz 的多普勒信号。假设运动目标速度在 1 m/s(步行速度)到 100 m/s(高速公路车辆相向运动时的相对速度)范围内,则多普勒信号的频率在 1.29~129 MHz 这一很宽的频率范围内变化。另外,激光雷达接收的是目标的反射信号,接收到的信号一般都很微弱,受限于当前的电子水平,PD2 输出的接收信号与 PD1 输出的外差信号都淹没在噪声中。在仿真中,以发射峰值功率 100 W、目标反射率 10% 为条件,根据雷达方程计算回波功率,并根据现有跨阻放大器噪声水平,设定 PD1 输出多普勒信号的信噪比为 0 dB。

调制码的宽度设为 2 ns,信号长度 770 ns 用于完成对目标的单次测量,这两个参数的设定保证了激光雷达具有较高的距离分辨率(几十厘米)和很高的扫描速度(达到甚至超过每秒 20 万次),满足智能驾驶领域对道路环境感知的要求。接收机 PD1 输出的外差信号如图 3(a)所示,前 50 ns 波形的放大显示如图 3(b)所示。为了演示算法工作原理,图中忽略了噪声。虚线代表 PD1 输出的经伪随机码调制的多普勒信号,对虚线波形采样,使用 FFT 并经过频率变换,所得的信号频谱中不包含对应于信号频率的峰值,因此不能解析出多普勒信号的频率。对码“0”区间之前的码“1”波形按照式(7)作幅度修正,对修正后的每个码“1”采样获得一个数据,再对采样获得的数据直接使用 FFT 可正确解析出 PD1 输出的经伪随机码调制的多普勒信号的频率。图中画出修正前后的模拟波形,实际计算信号频谱时,并不需要获得修正后的模拟波形,可直接对 PD1 输出信号的每个码元“1”时隙采样一次,并对获得的数据按照式(7)修正即可。

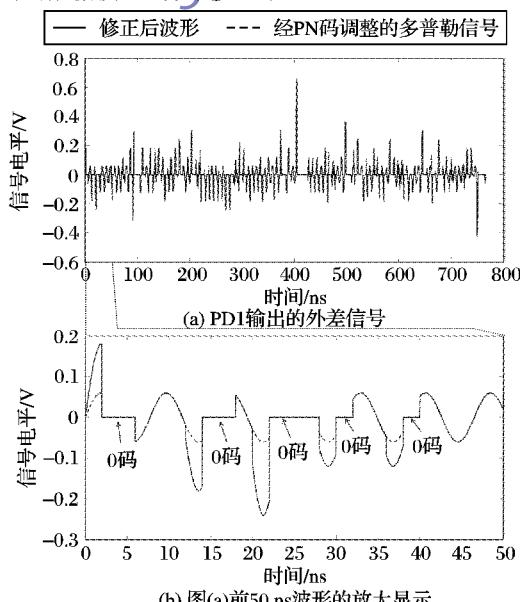


图 3 激光雷达接收机 PD1 输出的外差信号
以及经过幅度调整后的信号

对多普勒频率为 1.29、5、10、20、50、129 MHz 这 6 个频率的正弦波按照图 3 所示,先乘以 PN 码获得 PD1 输出的外差信号,并将 PN 码调制后的多普勒信号叠加高斯噪声,使输出信噪比为 0 dB;然后按照式(7)进行码“1”时隙信号幅度修正,再作 FFT 分析得到如图 4 所示的结果。结果表明本文提出的方法能够正确解析由道路运动目标产生的多普勒信号的频率,从而在测量目标距离的同时,能够测量目标的速度。

由于信号光的到达时间是随机的,因此 PD1 输出的多普勒信号初始相位也是一个随机的变量,有必要进一步对多普勒信号的初始相位进行分析。在 $[0, 2\pi]$ 范围内变换信号的初始相位,可以看到频谱峰值大小的微弱变化,但不影响峰值的检测。结果表明,本文提出的方法在计算多普勒信号的频率时不依赖于初始相位,这使得该方法能够在车载激光雷达中得到实用。

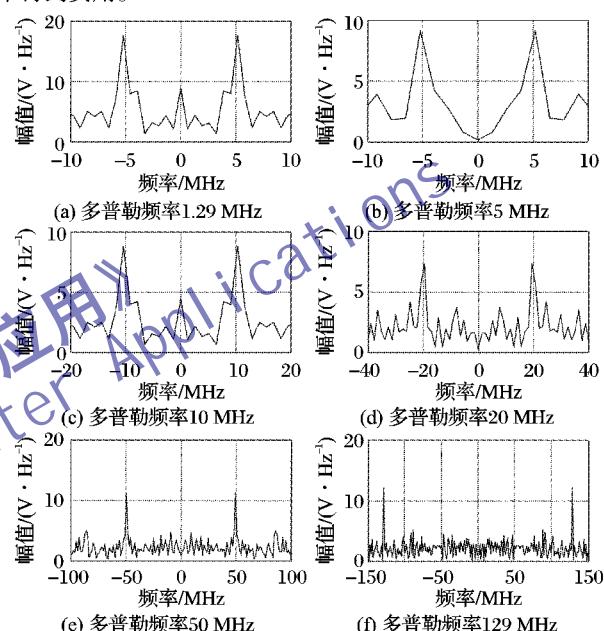


图 4 图 3 多普勒信号频谱分析结果

4 结语

本文首先介绍了同步测量目标距离和速度的车载激光雷达模型、工作原理以及其固有的不能等间隔采样外差信号的原因,指出不能直接使用 FFT 算法分析多普勒信号的频率;然后通过理论推导,得出了在已知各采样点间隔的情况下计算信号频谱的方法,即通过使用采样点间隔修正激光雷达接收信号波形,并对修正后的波形直接使用 FFT 的方法;最后,在接收信号的多普勒频率为 1.29~129 MHz 范围内,通过选取 6 个频率点,使用计算机仿真验证了该方法的有效性,以及该方法与接收信号初始相位的无关性。特别地,在接收信号信噪比为 0 dB 的情况下,本文方法可有效计算出信号的频谱。

参考文献:

- [1] COOLEY J W, TUKEY J W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series [J]. Mathematics of Computation, 1965, 19(90): 297~301.
- [2] ZENG G. A filtered backprojection MAP algorithm with nonuniform sampling and noise modeling [J]. Medical Physics, 2012, 39(4): 2170~2178.

(下转第 504 页)

- nal of Computer Research and Development, 2005, 42(10): 1679 – 1685.)
- [4] FATEMEH K, BEHZAD A. Automatic learning of attack behavior patterns using Bayesian [C]// IST 2012: Proceedings of the 2012 International Symposium on Telecommunications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2012: 999 – 1004.
- [5] ALIJABAR R, KOUROSH D A, ALI JI. Multi-level fusion to improve threat pattern recognition in cyber defense [J]. Journal of Mathematics and Computer Science, 2014, 8(2014): 398 – 410.
- [6] 梅海彬, 龚俭多. IDS 环境中基于可信度的警报关联方法研究 [J]. 通信学报, 2011, 32(4): 138 – 146. (MEI H B, GONG J D. Research on alert correlation method based on alert confidence in multi-IDS environment [J]. Journal on Communications, 2011, 32(4): 138 – 146.)
- [7] 李龙营. 入侵检测警报综合分析方法的研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 25 – 30. (LI L Y. Comprehensive analysis approach of intrusion detection alerts and its implementation [D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 25 – 30.)
- [8] TIAN Z, FANG B. A vulnerability-driven approach to active alert verification for accurate and efficient intrusion detection [J]. WSEAS Transactions on Communications, 2005, 4(10): 1002 – 1009.
- [9] 韦勇, 连一峰, 冯登国. 基于信息融合的网络安全态势评估模型 [J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(3): 353 – 362. (WEI Y, LIAN Y F, FENG D G. A network security situational awareness model based on information fusion [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(3): 353 – 362.)
- [10] 刘靖, 刘建伟, 张铁林, 等. 安全报警融合环境中信息的关联 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(25): 107 – 111. (LIU J, LIU J W, ZHANG T L, et al. Association of information in security alerts fusion environment [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(25): 107 – 111.)
- [11] 何肖慧, 田盛丰, 穆成坡, 等. 分布式入侵检测环境中报警信息整合模型的设计与实现[J]. 计算机科学, 2006, 33(11): 266 – 269. (HE X H, TIAN S F, MU C P, et al. Designing and implementation of distribute intrusion detection system alerts fusion model [J]. Computer Science, 2006, 33(11): 266 – 269.)
- [12] RAJARAMAN A, ULLMAN J D. 互联网大规模数据挖掘与分布式处理[M]. 王斌, 译. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 110 – 112. (RAJARAMAN A, ULLMAN J D. Mining of massive datasets [M]. WANG B, translated. 2nd ed. Beijing: Posts & Telecomm Press, 2014: 110 – 112.)
- [13] 李弼程, 王波, 魏俊, 等. 一种有效的证据理论合成公式[J]. 数据采集与处理, 2002, 17(1): 34 – 36. (LI B C, WANG B, WEI J, et al. An efficient combination rule of evidence theory [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2002, 17(1): 34 – 36.)
- [14] 赖积保. 基于异构传感器的网络安全态势感知若干关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 54 – 73. (LAI J B. Research on some key technologies for heterogeneous sensors-based network security situation awareness [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009: 54 – 73.)

Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61309013).

QIU Hui, born in 1990, M. S. candidate. His research interests include network security and situation awareness.

WANG Kun, born in 1975, Ph. D., associate professor. His research interests include network security and data mining.

YANG Haopu, born in 1993, M. S. candidate. Her research interests include network security and attack detection.

(上接第 494 页)

- [3] ZHU Z Q, ZHANG Z M, WANG R, et al. Out-of-band ambiguity analysis of nonuniformly sampled SAR signals [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2027 – 2031.
- [4] PIERROTTET D, AMZAJERDIAN F, PETWAY L, et al. Linear FMCW laser radar for precision range and vector velocity measurements [J/OL]. MRS proceedings, 2008, 1076 [2015-05-02]. <http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=7990284&fileId=s1946427400031225>.
- [5] GAO S, O'SULLIVAN M, HUI R. Complex-optical-field lidar system for range and vector velocity measurement [J]. Optics Express, 2012, 20(23): 25867 – 25875.
- [6] MAO X, INOUE D, MATSUBARA H, et al. Demonstration of in-car Doppler laser radar at 1.55 μm for range and speed measurement [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2): 599 – 607.
- [7] MAO X S, INOUE D, KATO S, et al. Amplitude-modulated laser radar for range and speed measurement in car applications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 408 – 413.
- [8] MAYMON S, OPPENHEIM A V. Sinc interpolation of nonuniform samples [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(10): 4745 – 4758.
- [9] SELVA J. FFT interpolation from nonuniform samples lying in a regular grid [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(11): 2826 – 2834.
- [10] XU S Q, CHAI Y, HU Y Q, et al. Reconstruction of digital spectrum from periodic nonuniformly sampled signals in offset linear canonical transform domain [J]. Optics Communications, 2015, 348: 59 – 65.
- [11] LIU W, LIU J, QIAO L. Use of polynomial approximation for reconstruction of periodic nonuniformly sampled signals [C]// ISPEMI '12: Proceedings of the 8th International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, SPIE 8759. Bellingham, WA: SPIE, 2012: 87590E.
- [12] BABU P, STOICA P. Spectral analysis of nonuniformly sampled data — a review [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(2): 359 – 378.
- [13] LAGUNAS E, NAJAR M. Spectral feature detection with sub-Nyquist sampling for wideband spectrum sensing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 3978 – 3990.
- [14] REHFELD K, MARWAN N, HEITZIG J, et al. Comparison of correlation analysis techniques for irregularly sampled time series [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2011, 18(3): 389 – 404.

Background

This work is partially supported by the Natural Science Foundation of Hubei Province (2014CFB815).

FANG Jianchao, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include laser radar signal processing.

MAO Xuesong, born in 1975, Ph. D., professor. His research interests include laser radar signal processing and nonlinear fiber optics.