

改进线性拟合的调制信号载波频率估计算法

田克纯¹, 魏丽^{1*}, 丁萌²

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004; 2. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

(* 通信作者电子邮箱 spvivi@126.com)

摘要:为提高基于线性拟合的频率估计算法的抗噪性,根据调制信号的时域特征,在基于最小二乘法的基础上,研究了将随机抽样一致(RANSAC)算法用于载波频率估计。利用 RANSAC 算法进行直线拟合,来完成调制信号载波频率估计中的参数拟合。以具有单一载波的数字调制方式振幅键控(ASK)和移相键控(PSK)得到的调制信号为研究对象,在 Matlab 环境下进行仿真实验,结果表明:与基于最小二乘法的方法相比,所提出的载波频率估计方法的误差率明显降低,同时具有较好的抗噪性。

关键词:调制信号识别;载波频率估计;随机抽样一致算法

中图分类号: TN911.6 **文献标志码:** A

Improved linear fitting algorithm of modulated signal carrier frequency estimation

TIAN Ke-chun¹, WEI Li^{1*}, DING Meng²

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: To enhance the noise restraint of modulated signal carrier frequency estimation algorithm based on linear fitting, in accordance with the features of modulating signal in the time domain, an estimation algorithm combined with RANdom Sample Consensus (RANSAC) based on least square method was proposed. It regarded modulating signals obtained by Amplitude-Shift Keying (ASK) and Phase-Shift Keying (PSK) which have single carrier frequency as research subjects, and did simulation experiments in Matlab. The experimental results indicate that the method introduced in this paper is better than the method based on least square method in the error rate and noise restraint.

Key words: modulated signal recognition; carrier frequency estimation; RANdom Sample Consensus (RANSAC) algorithm

0 引言

从 20 世纪末开始发展起来的软件无线电技术的最终目标是设计出一种通信平台,使得不同传输体制和传输速率的通信设备之间实现相互通信。因此,通信信号调制方式的识别成为其中核心技术之一^[1-2]。由于软件无线电的多频段、多功能、多体制的特性,实现通信就必须识别出发射信号的调制方式,如振幅键控(Amplitude Shift Keying, ASK)和移相键控(Phase Shift Keying, PSK)等,以及相应的调制参数,如载波频率和码元速率等。在数字调制信号类型识别中,特征提取是一个重要步骤,直接关系到识别效果^[3-4]。以时域特征提取算法得到的特征值为例,如信号归一化中心瞬时幅度谱最大值,零中心非微弱信号段瞬时相位非线性分量绝对值的标准差,零中心非微弱信号段瞬时相位非线性分量直接值的标准差,零中心归一化瞬时幅度绝对值的标准差,零中心非微弱信号段归一化瞬时频率绝对值的标准差等。在计算这些特征值前,需要首先估计出载波信号的频率,估计结果直接关系到基于决策树的调制信号识别算法中的门限值设置和最终的识别率。除了在调制信号识别中,通信信号的载波频率估计还有着广泛的应用领域,如在设计全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、全球导航卫星系统(Global

Navigation Satellite System, GLONASS)和“北斗”组合导航接收机时,由于各类型导航卫星发射信号的载波频率不同,因此接收机的第一个任务是估计出接收信号的载波频率,以此作为导航信号解调的前提。除此以外,在军事通信以及民用无线电通信管理等方面,调制信号的载波频率估计亦有广泛应用^[5]。

就单纯的频率估计技术而言,作为信号处理的一个重要分支,一直是国内外学者研究及关注的热点。总体上,频率估计可以分为三类^[6]:时域、频域和时-频域。时域上的方法,如过零检测法、最大似然法等,其主要特点是受噪声影响大,低信噪比估计误差很大;频域方法,如 Pisarenko 谐波分解法、Prony 方法等^[7],相比于时域方法,频域方法的抗噪声性能有所提高,然而其在低信噪比情况下的估计性能不佳,为此又有学者提出了子空间类方法,如多重信号子空间分类^[8]等,其在低信噪比情况下的估计性能明显提高;在时-频域方法方面:黄佑勇等^[9]利用时频分布研究瞬时频率估计算法,并将其与其他多种算法进行了比较,其最大的缺点是计算效率相对较低,因此如何提高时频分布的计算效率和改善瞬时频率估计精度是该类算法的研究方向。

除了以上三类经典算法以外,为了实时获得信号频率信息,另外一种更直观的方法是仅处理少数采样数据点即短数

收稿日期:2011-08-05;修回日期:2011-09-30。

基金项目:广西自然科学基金资助项目(桂科自 0832245);南京航空航天大学引进人才基金资助项目(1007-56YAH10047)。

作者简介:田克纯(1951-),男,广西桂林人,教授,主要研究方向:软件无线电、移动通信;魏丽(1982-),女,江苏仪征人,硕士研究生,主要研究方向:调制信号识别;丁萌(1981-),男,江苏南京人,讲师,博士,主要研究方向:模式识别。

据快速频率估计。文献[6]提出了基于线性拟合的频率估计算法,这类方法只需几个数据点便能得到输入信号的频率估计值,但其最大缺点是对噪声的敏感性。本文以提高抗噪性为出发点,在基于线性拟合的频率估计的基础上,利用参数拟合中经典的随机抽样一致(RANdom Sample Consensus, RANSAC)算法^[10],完成频率估计中的参数拟合,以此提高了现有的基于线性拟合的频率估计算法的抗噪性。

1 算法原理

1.1 基于线性拟合的频率估计

从任一时刻 t_n 起对无噪声正弦载波信号 $x(t)$ 离散采样得到的数据有:

$$\begin{cases} x(t_n) = A \sin(n2\pi f T_s + \theta) \\ x(t_{n+1}) = A \sin((n+1)2\pi f T_s + \theta); \\ x(t_{n+2}) = A \sin((n+2)2\pi f T_s + \theta) \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-2 \quad (1)$$

其中: f 为信号频率, T_s 为采样周期, θ 为任意初始相位。式

(1) 利用三角函数关系式可得:

$$\begin{aligned} \sin[(n+2)2\pi f T_s + \theta] = \\ 2\cos(2\pi f T_s) \sin[(n+1)2\pi f T_s + \theta] - \\ \sin(n2\pi f T_s + \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可得如下差分方程:

$$2\cos(2\pi f T_s) x(t_{n+1}) = x(t_n) + x(t_{n+2}); \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-2 \quad (3)$$

对于在无噪声条件下的实正弦信号,当 $x(t_{n+1}) \neq 0$ 时利用式(3)可通过三个采样点数据进行频率估计:

$$f = \frac{\cos^{-1} \left[\frac{x(t_{n+2}) + x(t_n)}{2x(t_{n+1})} \right]}{2\pi T_s}; n = 0, 1, 2, \dots, N-2 \quad (4)$$

式(4)可进一步写成:

$$y_n = kZ_n \quad (5)$$

其中: $y_n = x(t_{n+2}) + x(t_n)$, $Z_n = 2x(t_{n+1})$, $k = \cos(2\pi f T_s)$ 。

这时频率估计问题就转换为利用一系列相邻采样点拟合一条过原点直线的问题。在有噪声情况下,直线拟合的常用方法是最小二乘法,即使得拟合出的直线到各拟合点的距离平方和最小。文献[6]给出了利用最小二乘法进行频率估计的公式:

$$k = \cos(2\pi f T_s) = \frac{-(V-W) + \sqrt{4U^2 + (V-W)^2}}{2U} \quad (6)$$

其中: $W = \sum_{n=1}^m y_n^2$, $U = \sum_{n=1}^m y_n z_n$, $V = \sum_{n=1}^m z_n^2$, m 为参与拟合的数据点的个数。

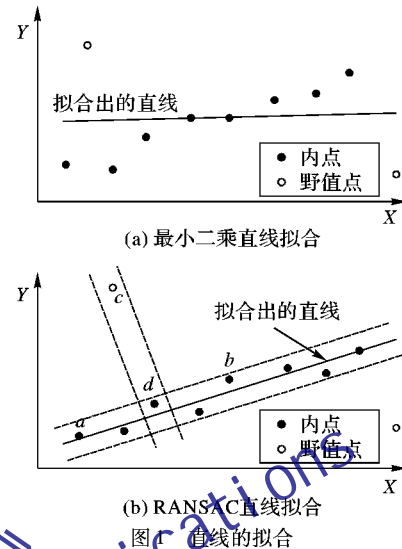
为了进一步提高算法的抗噪性,本文在此基础上引入 RANSAC 算法进行直线拟合,进而完成频率估计。

1.2 基于 RANSAC 算法的直线拟合

相较于传统的最小二乘拟合方法, RANSAC 算法能够应付大比例的野值,其对于噪声具有较强的鲁棒性,因此近年来该方法被广泛地应用于信息处理、数据挖掘领域,取得了较好的效果。

基于 RANSAC 算法的直线拟合的基本思想如下^[10]:随机地从待拟合的样本点中选择两点,由这两点定义一条直线,该线的支集(所有属于这条直线的样本点的集合)由在一定距离阈值内的点的数量来度量,使这样的随机选择重复多次,得

到具有最大支集的直线就认为是鲁棒拟合,点到直线的距离小于距离阈值的称为内点(并由此组成一致集)。如图1所示,点数据的最小二乘拟合受野值严重影响,而在 RANSAC 算法中随机选择的点对组成的直线的支集由该线两侧不超过距离阈值内的点的数量来决定,如图1,线 $\langle a, b \rangle$ 的支集是8个点,而线 $\langle c, d \rangle$ 的支集是2个点,因此最终的拟合结果是线 $\langle a, b \rangle$ 。



由上文的描述可知,在 RANSAC 算法中存在着两个待定量:距离阈值和随机重复采样的次数。在选择距离阈值时,往往需要知道内点到待拟合直线距离的概率分布,因此在实际应用中距离阈值的选择主要是依靠经验。在选择采样次数时,最简单的办法是尝试每个可能样本,但这样做不可能也没有必要,同时也失去了 RANSAC 算法的意义。实际上,只要采样次数 N 足够大,以保证 S 个点组成的随机样本中至少有一次没有野值的概率为 P , P 一般取 0.99。假定 ω 是任意选择的数据点为内点的概率,那么 $\varepsilon = 1 - \omega$ 是其为野值的概率,那么至少需要 N 次选择(每次 S 个样本点),其中 $(1 - \omega^S)^N = 1 - P$, 从而有:

$$N = \frac{\lg(1 - P)}{\lg(1 - (1 - \varepsilon)^S)}$$

根据这一原理,文献[10]给出了自适应确定 RANSAC 算法采样次数的算法,本文在此不再赘述。

1.3 基于 RANSAC 算法的频率估计

本文的主要任务就是在基于最小二乘法的调制信号载波频率估计的基础上,将具有较高抗噪性的 RANSAC 算法引入到载波频率的估计中,也就是利用 RANSAC 算法对式(5)进行拟合,具体算法流程如下:

- 步骤1 对接收到的已调信号进行采样,得到 n 组采样数据,同时确定采样周期 T_s ;
- 步骤2 根据得到的 n 组采样数据,得到式(3)表示的差分方程;
- 步骤3 利用式(5)得到 $n-2$ 组用于 RANSAC 算法直线拟合的数据;
- 步骤4 利用 RANSAC 算法完成直线拟合,得到 k 值;
- 步骤5 根据 $k = \cos(2\pi f T_s)$ 得到载波频率 f 的估计值。

2 仿真实验与分析

本文以具有单一载波的数字调制方式振幅键控 (Amplitude-Shift Keying, ASK) 和移相键控 (Phase-Shift

Keying, PSK)得到的调制信号为研究对象,在 Matlab 环境下研究基于 RANSAC 算法的载波频率估计方法针对不同载波频率的准确性,对于不同信噪比环境下的鲁棒性,并将相关结果与文献[6]的方法相比较。同时分析对于相同长度的数字基带信号,采样频率 $f_s = 1/T_s$ 与载波频率 f_c 之间的比值对估计算法精度的影响。为方便起见,本文选择的信道噪声主要是高斯白噪声,即加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道模型。选择的数字调制方式包括:2ASK,

4ASK, 8ASK, 2PSK, 4PSK, 8PSK。

2.1 不同载波频率下的估计误差

本节研究载波频率变化从 1 000 kHz 到 5 000 kHz 的范围内, $f_s = 12\ 000$ kHz,信噪比为 20 dB 下的平均误差率(每个载波频率独立计算 100 次得到的平均误差率),并将其得到的误差率和文献[6]得到的误差率进行比较。从图 2 可见,对于 6 种调制方式,在相同的信噪比,不同的载波频率下,本文算法得到的估计值的误差率明显低于文献[6]的误差率。

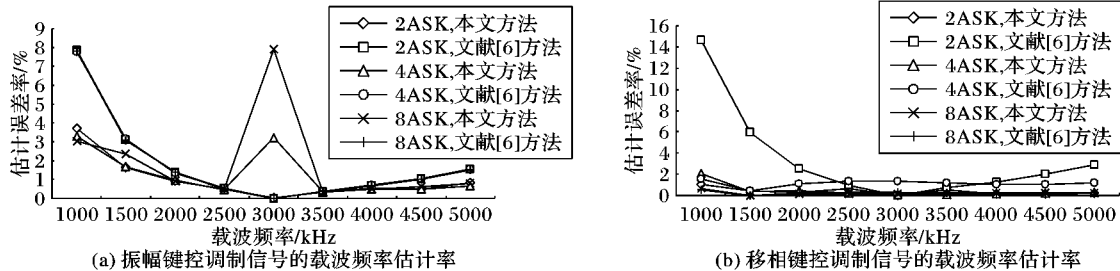


图2 不同频率的调制信号的载波频率估计

2.2 不同信噪比下的估计误差

本节研究信噪比变化从 20 dB 到 8 dB 的范围内,调制信号的载波频率为 10 000 kHz, $f_s = 12\ 000$ kHz 的估计平均误差率(每个信噪比独立计算 100 次得到的平均误差率),并将其

与文献[6]得到的误差率进行比较。从图 3 可见,对于 6 种调制方式,不同类型的调制信号在不同信噪比,相同载波频率下,本文算法得到的估计值的误差率明显低于文献[6]的误差率。

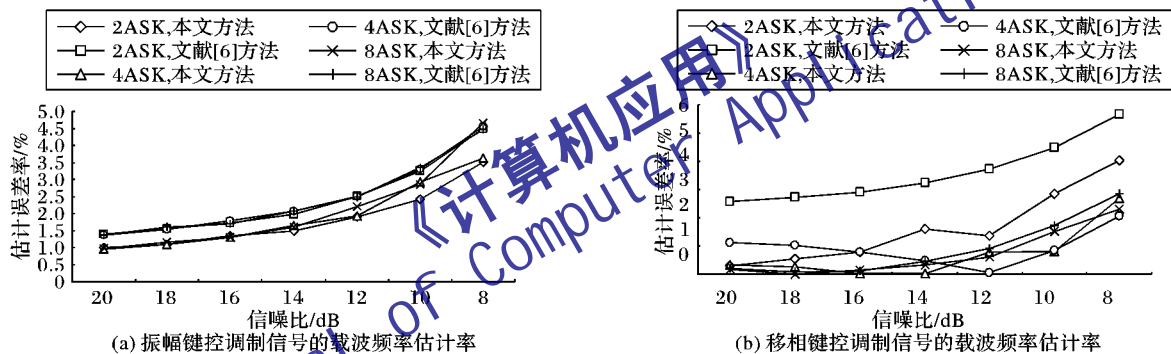


图3 不同信噪比下调制信号的载波频率估计

2.3 采样频率 f_s 与载波频率 f_c 的比值对估计误差的影响

当采样频率一定时,载波频率和估计误差率的关系由图 2 给出。当载波频率一定时,随着采样频率的增加,参加载波频率估计运算的样本点的数量随之增加,可以有效降低误差率,但是随之而来的是运算量急剧增加。因此为了提高算法的运算效率,必须研究采样频率与载波频率的关系对平均估计误

差(每个 f_s/f_c 独立计算 100 次得到的平均误差率)的影响。从图 4 可见,当采样频率 f_s 与载波频率 f_c 的比值大于 2 时,本文算法得到的载波频率估计值的误差率小于 10%,而文献[6]的算法这一比值需要大于 2.5。从图 4 同时可见,当采样频率 f_s 与载波频率 f_c 的比值等于 3 时,本文算法在估计准确度和运算量之间可以得到最佳平衡效果。

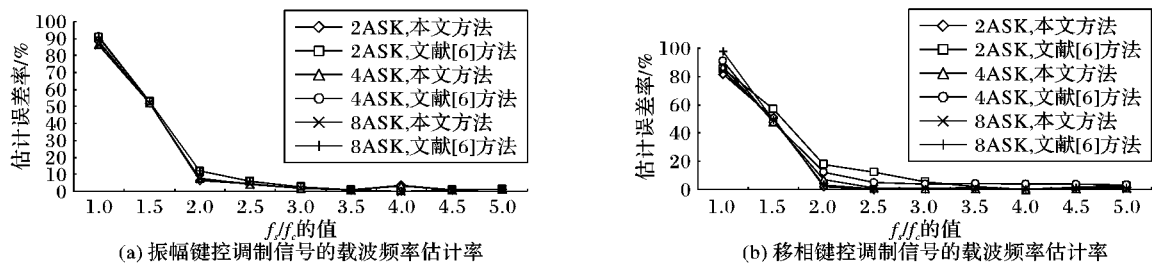


图4 不同 f_s/f_c 下调制信号的载波频率估计

3 结语

本文提出了一种基于 RANSAC 算法的调制信号载波频率估计方法,以具有单一载波的数字调制方式振幅键控(ASK)和移相键控(PSK)得到的调制信号为研究对象,仿真实验表明:与文献[6]方法相比,无论是不同的载波频率还是不同的信噪比,本文提出的载波频率估计方法的误差率明显降低,说明基于 RANSAC 算法的载波频率估计方法具有较好

的抗噪性。同时,当采样频率与载波频率的比值等于 3 时,本文算法在估计准确度和运算量之间可以得到最佳平衡效果。

参考文献:

- [1] SHERMEH A E, AZIMI H. Blind signal-type classification using a novel robust feature subset selection method and neural network classifier [J]. Annals of Telecommunications, 2010, 65(9/10): 625 - 633.

(下转第 380 页)

周期的最理想情况是本文 3 倍以上。因此,本文所设计的编码器结构能够大幅度降低编码时延,相应提高了编码吞吐量。

2) 在资源消耗上,本文编码所需硬件资源明显低于文献 [11-12],从而大幅度减少硬件资源消耗,节省了成本。

表 1 资源消耗情况

编码方法	编码时钟周期/ μs	存储器容量/bit	寄存器容量/bit	异或门(XOR)	与门(AND)	循环移位寄存器
本文方法	122	26 915	1 536	7 680	0	17
文献	串行	6 144	92 160	24 576	12 288	32
[11-12]	并行	12 288	92 160	6 144	6 144	16
方法	串联合	384	92 160	196 608	196 608	512

综上所述,本文设计的编码器结构,能够在编码时延和资源消耗上达到一个平衡点,即用相对较少的资源消耗就能获得较高的编码吞吐量。此外,该编码器的 H-ROM 模块经过重新配置参数后可实现具有类似校验矩阵的 LDPC 码编码。

4 结语

本文分析了 LTE-Advanced 标准下的 LDPC 码,研究了其校验矩阵构造,并在串行编码方法基础上设计了一种应用于 LTE-Advanced 标准的低成本高吞吐量 LDPC 码编码器。实验结果表明,与同类方法比较,该编码器不仅能够减少编码所需时间,还能够降低资源消耗和硬件实现复杂度。此外,该编码器结构灵活多变,能够适用于多种码长码率的校验矩阵编码,具有一定的通用性。

参考文献:

- [1] 3GPP TS 36. 212 v8. 5. 0, Multiplexing and channel coding [S]. 2008.
- [2] 3GPP TR 36. 912, Feasibility study for further advancements for E-UTRA (LTE-Advanced) [S]. 2009.
- [3] R1-081752, Proposals on PHY related aspects in LTE advanced agenda item: 6. 2, 3GPP TSG RAN#53 [R]. Kansas City: [s. n.], 2008.
- [4] ZHANG HUXING, YU HONGYANG. Multi-rate QC-LDPC encoder [C]// ICTD 2009: IEEE Circuits and Systems International Conference on Testing and Diagnosis. Piscataway: IEEE, 2009: 1-4.
- [5] BERROU C, GLAVIEUX A. Near-optimum error-correcting coding and decoding: Turbo codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(10): 1261-1271.
- [6] GALLAGER R G. Low-density parity-check codes [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, IT-8: 21-28.
- [7] GALLAGER R G. Low-density parity-check codes [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, 1963.
- [8] CHOI S, SANDEEP PRADHAN S. A graph-based framework for transmission of correlated sources over broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(7): 2841-2856.
- [9] GONG CHEN, LIU QI, CUI HUIJUAN, *et al.* Switch-type hybrid hard decision decoding algorithms for regular low-density parity-check codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(7): 3181-3188.
- [10] XU JIN, XU JUN. Structured LDPC applied in IMT-advanced system [C]// WiCOM '08: 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE, 2008: 1-4.
- [11] CHEN LIANG, YAN SHIJUN, ZHANG WENJUN, *et al.* Hardware design of quasi cyclic low-density parity-check encoder based on a novel RC-scheme [C]// ICCSC 2008: 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. Piscataway: IEEE, 2008: 594-598.
- [12] CHEN LIANG, YAN SHIJUN, SHI XIUMIN, *et al.* Flexible hardware encoding schemes for extended quasi-cyclic low-density parity-check codes [C]// ISSPA 2007: 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications. Piscataway: IEEE, 2007: 1-4.
- [13] KIM J K, YOO H, LEE M H. Efficient encoding architecture for IEEE 802. 16e LDPC codes [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2008, E91-A(12): 3607-3611.
- [14] RICHARDSON T J, URBANK R L. Efficient encoding of low-density parity-check codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 638-656.
- [15] CAI Z, HAO J, TAN P H, *et al.* Efficient encoding of IEEE 802. 11n LDPC codes [J]. IET Electronics Letters, 2006, 42(25): 1471-1472.

(上接第 376 页)

- [2] SUE W, JEFFERSON L X, MENGCHOU Z. Real-time modulation classification based on maximum likelihood [J]. IEEE Communication Letters, 2008, 12(11): 801-803.
- [3] AVCI D. An intelligent system using adaptive wavelet entropy for automatic analog modulation identification [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(4): 1196-1206.
- [4] XU J L, SU WEI, ZHOU MENGCHU. Software-defined radio equipped with rapid modulation recognition [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1659-1667.
- [5] ZENG DEGUO, XIONG HUI, WANG JUN, *et al.* An approach to intra-pulse modulation recognition based on the ambiguity function [J]. Circuits System Signal Process, 2010, 29(6): 1103-1122.
- [6] 杨水旺. 数字中频接收机关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [7] WAHLBERG B O. ARMA spectral estimation of narrow band processes via model reduction [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990, 38(7): 1144-1154.
- [8] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [9] 黄佑勇, 王激扬, 陈天麒. 基于欠采样的宽频段信号频率估计技术 [J]. 电波科学学报, 2001, 16(2), 16: 275-279.
- [10] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communication of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.