

引用格式:俞华,季凯源,蒋长辉.多接收机欺骗干扰检测算法研究[J].电光与控制,2020,27(4):11-14. YU H, JI K Y, JIANG C H. A spoofing detection algorithm based on multiple receivers[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4):11-14.

多接收机欺骗干扰检测算法研究

俞 华¹, 季凯源¹, 蒋长辉²

(1. 中国船舶重工集团公司第七二三研究所,江苏 扬州 225001; 2. 南京理工大学,南京 210094)

摘 要: 卫星导航系统提供全球、高精度、实时定位信息,深刻改变了人们的生活。然而针对卫星导航系统的欺骗干扰技术严重危害了卫星导航系统的安全,研究卫星导航系统的抗欺骗干扰技术迫在眉睫。提出了一种基于 SVD 的多接收机联合欺骗干扰检测算法,利用多接收机的位置向量构建欺骗干扰检测矩阵,利用 SVD 对检测矩阵进行分解,检测矩阵可以分成 3 个矩阵相乘的形式,其中中间一个矩阵是对角矩阵,除了对角线上的值之外,其他值都为零。通过此对角矩阵的奇异值来判断是否存在欺骗干扰,并采用地心地固坐标系下的位置信息构建检测矩阵。实验表明:存在欺骗干扰时,奇异值平方的累加和的 80% 都集中在前 3 个奇异值;无欺骗干扰时,奇异值分散均匀。利用这种差异可以准确地检测出是否存在欺骗干扰。

关键词: 卫星导航; 多接收机; 欺骗干扰; 奇异值; 协方差矩阵

中图分类号: TN967.1 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.003

A Spoofing Detection Algorithm Based on Multiple Receivers

YU Hua¹, JI Kaiyuan¹, JIANG Changhui²

(1. No. 723 Research Institute, China Shipbuilding Industry Company, Yangzhou 225001, China;

2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The Global Navigation Satellite System (GNSS) provides global, accurate and real-time positioning information, which has profoundly changed people's lives. However, the spoofing attack on GNSS seriously endangers the system, so it is urgent to study anti-spoofing technology. In this paper, a spoofing detection algorithm based on the position vector matrix of multiple receivers is proposed by using the Singular Value Decomposition (SVD) method. The position vector of the multiple receivers is employed to construct the spoofing detection matrix. Then, by using the SVD method, the detection matrix is decomposed into a form in which three matrices are multiplied. One of the matrices is a diagonal matrix, in which the values are zero except those on the diagonal. The singular value of the diagonal matrix is used to determine whether there is spoofing attack. The detection matrix constructed here uses the position information in the geocentric body-fixed coordinate system. The experiment results show that: when there is spoofing attack, 80% of the sum of the square of the singular values is concentrated in the first three singular values; when there is no spoofing attack, the singular values distributes evenly. This difference can be employed for accurately detecting whether there is spoofing interference.

Key words: GNSS; multi-receiver; spoofing attack; singular value; covariance matrix

0 引言

自从卫星导航系统问世以来,极大地改变了人们的生活。它可以为汽车、飞机、行人等各种用户提供三维、实时、精确的全球定位导航信息,极大地方便了人

们的生活。经过多年的发展,除了美国的全球定位导航系统(GPS),还有中国的北斗导航定位系统(BDS)、俄罗斯格洛纳斯导航定位系统(GLONASS)、欧盟的伽利略导航定位系统(Galileo)以及其他部分地区性导航定位系统逐渐投入使用^[1-3]。卫星导航系统的基本原理是:地面的接收机接收导航卫星发送的信号,接收机通过接收导航卫星信号来计算自身与卫星之间的距离,当接收机卫星数大于或者等于 4 颗时可以准确地计算自身的位置和时间信息。然而信号经过长距离传

收稿日期:2019-03-25 修回日期:2019-05-08

基金项目:中国博士后科学基金(2015M580434)

作者简介:俞 华(1982—),男,江苏苏州人,硕士,工程师,研究方向为导航和控制。

输到达地球之后很微弱,很容易受到不同程度的干扰,除了常见的压制干扰之外,近年来欺骗干扰逐渐成为危害卫星导航系统安全的重要途径^[1-5]。压制干扰主要是通过播放噪声信号来淹没有用的导航信号,而欺骗干扰是指故意释放假的导航信号,引导目标到达错误的位置,没有经过特殊算法设计的接收机本身很难察觉到这种欺骗干扰^[1-5]。

正是由于欺骗干扰的危害巨大,国内外学者进行了一些研究,大部分研究主要是从信号层面进行欺骗干扰检测,文献[2]分析了转发式欺骗干扰对接收机定位的影响;文献[3]介绍了信号欺骗的内在原理,同时给出了一种检测方法;文献[4-5]回顾了抗欺骗干扰技术的种类,其中,文献[5]基于双接收机的军用码信号欺骗检测方法,取得了很好的效果;文献[6]描述了一种基于钟差的欺骗检测方法;文献[7-9]分别从矢量跟踪、惯性辅助方面进行欺骗干扰的检测探索。除上述方法之外,文献[10-12]则采用接收机的位置信息和伪距信息在统计学的层面上进行假设检验,检测欺骗干扰;文献[13-14]对基于位置信息的检测方法进行了分析,但是没有进行实际场景实验。总的来讲,欺骗干扰检测分为以下几个主要途径:在天线和射频信号处理层面,通过特殊设计的天线加上射频处理算法,从信号的最前端检测欺骗干扰;在接收机的基带信号处理层面,通过对基带处理输出的数据进行分析,检测欺骗干扰的存在;在接收机输出信息端对欺骗干扰进行检测,主要是通过处理接收机输出信息,比如位置、速度和时间信息等^[1-14]。前两种方法需要对接收机进行改进,特制的天线和射频需要较大的成本,现有的接收机很多无法进行内部处理算法的更新;而对接收机输出信息进行处理,从而检测欺骗干扰是一种更加便捷实用的方法。

本文提出一种利用多接收机位置信息进行欺骗干扰检测的方法,相对于利用接收机内部信息,利用位置信息更加方便,不需要改变接收机内部结构。在本方法中,利用至少两个接收机的位置信息构成位置特征矩阵,分别计算有欺骗干扰和没有欺骗干扰下的特征矩阵的特征值,通过观察矩阵特征值的变化,定义一种判决因子来判定是否存在欺骗干扰,最后通过实际场景实验验证了算法的有效性。

1 检测模型建立

假设第 k 个接收机的位置向量为 $[x_k, y_k, z_k]$,采用地心地固坐标系下的位置,因为在东北天坐标系下位置误差单位不统一。位置信息向量构建为 $[x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n]$ 。当没有欺骗信号时,接收机之间的位置

是不相关的,只和接收的信号质量、空间卫星分布等有关,双接收机情况下的位置矩阵检测为

$$\mathbf{M}_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{12} & \cdots & z_{16} \\ x_{21} & y_{22} & \cdots & z_{26} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & y_{m2} & \cdots & z_{m6} \end{bmatrix} = [\mathbf{A}_1 \ \mathbf{A}_2 \ \cdots \ \mathbf{A}_6] \quad (1)$$

式中, m 表示采用的位置矩阵的数量,矩阵 \mathbf{M} 的自相关结果为

$$\text{cov}(\mathbf{M}) = \begin{bmatrix} \text{cov}(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_1) & \text{cov}(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2) & \cdots & \text{cov}(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_6) \\ \text{cov}(\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_1) & \text{cov}(\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_2) & \cdots & \text{cov}(\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_6) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \text{cov}(\mathbf{A}_6, \mathbf{A}_1) & \text{cov}(\mathbf{A}_6, \mathbf{A}_2) & \cdots & \text{cov}(\mathbf{A}_6, \mathbf{A}_6) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,函数 $\text{cov}(\mathbf{M})$ 表示相关运算。当存在欺骗干扰时,尤其是转发式欺骗干扰, $\text{cov}(\mathbf{M})$ 可以表示为

$$\text{cov}(\mathbf{M})_s = \begin{bmatrix} \text{cov}(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_1) & 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_4) & 0 & 0 \\ 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_2) & 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_5) & 0 \\ 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_3, \mathbf{A}_3) & 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_3, \mathbf{A}_6) \\ \text{cov}(\mathbf{A}_4, \mathbf{A}_1) & 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_4, \mathbf{A}_4) & 0 & 0 \\ 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_5, \mathbf{A}_2) & 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_5, \mathbf{A}_5) & 0 \\ 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_6, \mathbf{A}_3) & 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_6, \mathbf{A}_6) \end{bmatrix} \quad (3)$$

除了对角线的元素不为零,还存在其他的元素不为零,这是因为两个接收机被相同的信号欺骗,导致位置信息高度相关。无欺骗情况下的矩阵为

$$\text{cov}(\mathbf{M})_{ns} = \begin{bmatrix} \text{cov}(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_3, \mathbf{A}_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_4, \mathbf{A}_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_5, \mathbf{A}_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{cov}(\mathbf{A}_6, \mathbf{A}_6) \end{bmatrix} \quad (4)$$

只有对角线上的元素不为零,其他元素由于接收机不在同一个位置,相关性接近于零。

假设

$$\text{cov}(\mathbf{A}_i, \mathbf{A}_i) = \alpha \quad i = 1, \dots, 6 \quad (5)$$

$$\text{cov}(\mathbf{A}_{i+3*k}, \mathbf{A}_i) = \text{cov}(\mathbf{A}_i, \mathbf{A}_{i+3*k}) = \beta \quad i = 1, 2, 3 \quad k = 1 \quad (6)$$

这样式(3)和式(4)可以分别写成

$$\text{cov}(\mathbf{M})_s = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & \beta \\ \beta & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \beta & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$cov(M)_{ns} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

分别求取式(7)和式(8)的特征值,具体如下。 $cov(M)_s$ 的特征值为 $(\alpha + \beta, \alpha + \beta, \alpha + \beta, \alpha - \beta, \alpha - \beta, \alpha - \beta)$, $cov(M)_{ns}$ 的特征值为 $(\alpha, \alpha, \alpha, \alpha, \alpha, \alpha)$ 。

从上面特征值分析可知,有没有欺骗干扰对于特征值影响较大,因此根据特征值给出一种判定因子为

$$\lambda = \frac{d_{min1} + d_{min2} + d_{min3}}{d_{max1} + d_{max2} + d_{max3}} \quad (9)$$

式中: λ 为定义的判决因子; d_{min} 和 d_{max} 分别为最小特征值和最大特征值。结合以上计算结果可以发现,当存在欺骗干扰时,判定因子的值趋向于0;当不存在欺骗干扰时,判定因子的值趋向于1。

2 实验平台搭建与结果分析

2.1 实验场景

为了对以上分析进行验证,搭建了一个实际场景转发式欺骗干扰测试平台,并进行了实际场景实验。实验场景如图1所示,采用商用的U-BLOX接收机进行实验(图1中左下角和右下角),而欺骗干扰信号来自于信号转发器。实验过程中,先进行压制干扰,然后再打开欺骗干扰,这时候很容易欺骗接收机。

图1所示为实际实验场景。两个接收机均采用U-BLOX的商用接收机,定位精度为5 m,两个接收机天线相距5 m,导航定位结果1 s输出一次,通过串口通信向笔记本电脑中的监控软件传输数据,同时保存数据,采集大约10 min的数据。欺骗干扰是采用信号转发器进行模拟转发式干扰,首先利用压制干扰进行压制,然后再打开信号转发器成功欺骗接收机,转发器转发大约35 m之外的信号。根据前文的分析,分别对有欺骗干扰和没有欺骗干扰的场景下的判定因子的值进行分析。

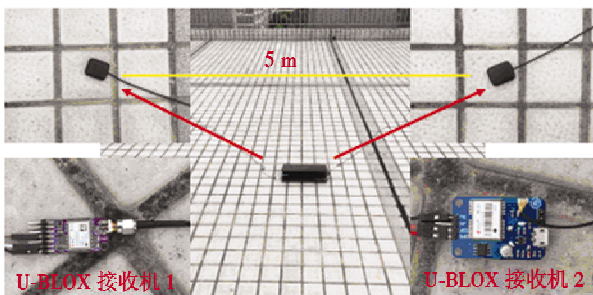


图1 实际场景数据采集

Fig.1 Data collecting in real scene

2.2 无干扰实验结果

图2为正常情况下的判定因子的值,实验进行了大约5 min,由结果可知,判定因子的值在0.8以上,这是由于检测矩阵中不同接收机的位置存在不相关性,特征值接近于相等。

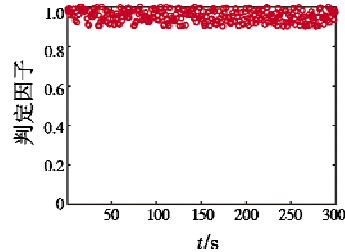


图2 无干扰时判定因子的值

Fig.2 Values of the indicator with no spoofing

2.3 转发式欺骗干扰实验结果

图3为存在转发式欺骗干扰情况下的判定因子的值,由结果可知,判定因子的值都在0.2以下。这是由于检测矩阵中不同接收机的位置存在相关性,导致构建的检测矩阵特征值中最小的3个值接近于零。通过图2和图3的结果可以看出欺骗信号对于接收机信息的影响,通过接收机之间的协作,方便地检测出是否存在欺骗干扰。

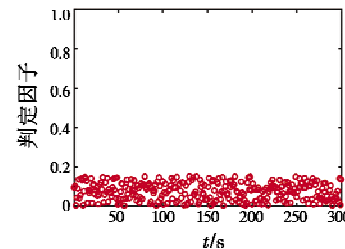


图3 转发式欺骗干扰下的判定因子的值

Fig.3 Indicator values under spoofing

3 结论

本文提出了基于多接收机的欺骗干扰检测算法,分析接收机自身不同时间段下同一个位置的检测矩阵特征值情况,根据特征值的变化,定义一个转发式欺骗干扰的检测因子,最后通过实际的场景实验对算法进行了验证。

参考文献

- [1] 马航帅,王丹,孙晓敏. GPS干扰欺骗信号对FMS导航安全性影响的测试分析[J]. 光电与控制,2016,23(11): 57-61.
- [2] 王海洋,姚志成,范志良,等. 对GPS接收机的欺骗式干扰试验研究[J]. 火力与指挥控制,2016,41(7): 184-187.
- [3] HUMPHREYS T E, LEDVINA B M, PSIAKI M L, et al.

- Assessing the spoofing threat: development of a portable GPS civilian spoofer[C]//Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2008:2314-2325.
- [4] JAFARNIA-JAHROMI A, BROUMANDAN A, NIELSEN J, et al. GPS vulnerability to spoofing threats and a review of anti-spoofing techniques[J]. International Journal of Navigation and Observation, 2012, 2012(9):1-16.
- [5] PSIAKI M L, O'HANLON B W, BHATTI J A, et al. GPS spoofing detection via dual-receiver correlation of military signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(4):2250-2267.
- [6] JIANG X C, ZHANG J M, HARDING B J, et al. Spoofing GPS receiver clock offset of phasor measurement units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):3253-3262.
- [7] JAFARNIA-JAHROMI A, LIN T, BROUMANDAN A, et al. Detection and mitigation of spoofing attacks on a vector-based tracking GPS receiver[C]//Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2012:1-11.
- [8] KHANAFSEH S, ROSHAN N, LANGEL S, et al. GPS spoofing detection using RAIM with INS coupling[C]//IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 2014. doi:10.1109/PLANS.2014.6851498.
- [9] LEE J H, KWON K C, AN D S, et al. GPS spoofing detection using accelerometers and performance analysis with probability of detection[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2015, 13(4):951-959.
- [10] SWASZEK P F, HARTNETT R J, KEMPE M V, et al. Analysis of a simple, multi-receiver GPS spoof detector[C]//Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2013:884-892.
- [11] JIANG C H, CHEN S, CHEN Y W, et al. Research on chip scale atomic clock driven GNSS/SINS deeply coupled navigation system for augmented performance[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2018, 13(2):326-331.
- [12] RADIN D, SWASZEK P F, SEALS K C, et al. GNSS spoof detection based on pseudoranges from multiple receivers[C]//Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2015:1-15.
- [13] JIANG C H, CHEN Y W, CHEN S, et al. Effectiveness analysis of the covariance matrix for spoofing detection application[C]//Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services(U PINLBS), 2018:1-5.
- [14] JIANG C H, CHEN S, CHEN Y W, et al. Analysis of the baseline data based GPS spoofing detection algorithm[C]//IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 2018:397-403.

(上接第 10 页)

过程中的振荡,不会造成无人机的过度机动,验证了避障算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] SAUNDERS J B. Obstacle avoidance, visual automatic target tracking, and task allocation for small unmanned air vehicles[D]. Utah: Brigham Young University, 2009.
- [2] SHARMA R. Bearing-only cooperative-localization and path-planning of ground and aerial robots[D]. Utah: Brigham Young University, 2011.
- [3] ESPOSITO J F. Real-time obstacle and collision avoidance system for fixed-wing unmanned aerial systems[D]. Kansas: University of Kansas, 2013.
- [4] 杨秀霞,周础础,张毅. 三维动态不确定 UAV 自主避障算法[J]. 电光与控制, 2017, 24(9):1-5.
- [5] FRIKHA R, EJBALI R, ZAIED M. Camera pose estimation for augmented reality in a small indoor dynamic scene[J]. Journal of Electronic Imaging, 2017, 26(5):053029-1-11.
- [6] SHARMA R, SAUNDERS J B, TAYLOR C N, et al. Reactive collision avoidance for fixed-wing MAVs flying in urban terrain[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009:1-11.
- [7] 张瑶,马广富,郭延宁,等. 一种多幂次滑模趋近律设计与分析[J]. 自动化学报, 2016, 42(3):466-472.
- [8] 宗群,张睿隆,董琦,等. 固定翼无人机自适应滑模控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(9):147-155.
- [9] MORENO J A, OSORIO M. Strict Lyapunov functions for the super-twisting algorithm[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(4):1035-1040.
- [10] HALL C E, SHTESSEL Y B. Sliding mode disturbance observer-based control for a reusable launch vehicle[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(6):1315-1328.
- [11] 周涛,王磊. 基于跟踪微分器的模型参考自适应控制[J]. 电光与控制, 2012, 19(10):46-49.