

利奇格网模型在卫星导航接收机中的应用

张燕, 王建中

(重庆青年职业技术学院 信息工程系, 重庆 400712)

摘要:提出一种利奇格网模型平均方法的导航接收机可靠性处理方法。该方法从可靠性处理的原理入手修改传统可靠性处理优化的约束项,消除了不同时延信号对合成信号的影响,从而保证可靠性处理过程中有效抑制干扰,并且不影响导航信号的捕获和解码。理论分析和仿真结果表明,该方法能有效解决可靠性处理中的卫星导航信号失真问题。

关键词:卫星导航系统;利奇格网模型;平均方法;卫星导航接收机;可靠性处理

本文引用格式:张燕,王建中.利奇格网模型在卫星导航接收机中的应用[J].兵器装备工程学报,2019,40(S2):192-198.

Citation format:ZHANG Yan, WANG Jianzhong. Application of Leach Grid Model in Satellite Navigation Receiver[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(S2):192-198.

中图分类号:TN384

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)S2-0192-07

Application of Leach Grid Model in Satellite Navigation Receiver

ZHANG Yan, WANG Jianzhong

(Information Engineering Department, Chongqing Youth Vocational & Technical College, Chongqing 400712, China)

Abstract: Reliability processing method of satellite navigation receiver based on LEACH grid model was put forward. This method modifies the constraints of traditional reliability processing optimization from the principle of reliability processing, eliminating the influence of different delay signals on synthetic signals, so as to ensure that interference is effectively suppressed in reliability processing without affecting the acquisition and decoding of navigation signals. It can effectively solve the problem of satellite navigation signal distortion in reliability processing.

Key words: satellite navigation system; LEACH grid model; average method; satellite navigation receiver; reliability processing

近年来,GPS、北斗、伽利略等卫星导航系统应用技术发展迅速,应用领域也十分广泛,不管是便携式还是车载体式、机载体式,都能够获得具有高精度的位置、速度、时间等信息,没有累积误差,已经广泛地用于军民领域。2018年11

月,我国已成功发射41颗北斗导航卫星^[1],已经具备区域导航能力,预计2020年将广泛用于全球导航服务。文献[2-3]中描述了如果卫星和地球表面之间的距离约为20000 km,那么此时卫星导航只能够接收到十分微弱的信号,基本只有-160 dB,甚至是弱于机热噪声的。文献[4]中提出,假

收稿日期:2018-11-16;修回日期:2019-02-20

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目“MEMS捷联惯性导航系统研究”(KJ1603902);重庆市基础科学与前沿技术研究专项“北斗组合导航系统的数据融合方法研究”(cstc2016jcyjA0138);新媒体环境下的教学资源管理云平台建设与教育教学深度融合研究(14069JG2017104)

作者简介:张燕(1976—),女,高级工程师,主要从事物联网、惯性导航研究,E-mail:359455290@qq.com;王建中(1979—),男,硕士,教授,主要从事计算机信息技术、惯性导航研究,E-mail:570691790@qq.com。

如是存在干扰的,那么此时卫星导航接收机是无法进行十分精确的定位的,因此,对于新一代卫星导航系统而言,研究的核心将会放在如何使得卫星导航具有较强的抗干扰能力。

在最近几年,我国学者也就卫星导航系统如何提高抗干扰性进行了十分丰富的研究。比如在文献[5]就如何实现卫星导航的较高抗干扰性进行了探究,提出了可以通过如下方法来实现,包括阵列天线技术,以使得空域滤波能力能够得到提高,还可利用可靠性检测来使得干扰影响能够降到最低。文献[6]中则提出了可以利用阵列信号处理这种方法来实现抗干扰能力的提高,尤其是可靠性处理 STAP (Space Time Adaptive Processing),能够在阵元数量保持不变的基础上来使得系统具有更高的抗干扰自由度,但是在文献[7]研究后得出,假如 STAP 中,将延迟信号加入其中,那么如果只是利用传统的 STAP,那么信号失真问题将会是十分严重的,最终的结果导致的将是信号严重失真,最终获得定位误差也将是无法接受的。目前很多学者已经就此进行了十分丰富的研究。文献[8]提出对于卫星信号失真问题,可以利用群时延约束方法来均衡,文献[9]提出可通过逆滤波器补偿算法来解决这一问题,文献[10]也提出了 STAP 补偿方法。而且在上述所提出的文献中都设定了一个基本假设,也就是假设如果未能够实现对干扰的有效消除,那么会产生十分严重的性能衰减问题。此外,在文献[10]中,还提出在某个时刻,时空处理之后可以得到标量数据,然而,获得的时间延迟响应系数却是矢量形式,故此,在这种情况下,因为 STAP 而导致的信号失真并没有获得根本解决。在本文基于 STAP 原理,对优化约束项来进行改进优化,从而提出了利奇格网模型平均方法的导航接收机 STAP。

1 数据处理分析

在传统 STAP 中,卫星导航信号被机载脉冲多普勒雷达的地(海)杂波抑制,对此,进行可靠性处理将不会对脉冲信号产生影响,即便是到达时间有所区别的情况,如果是导航信号,在 STAP 法中,使得 1 维的空域滤波能够被推广到 2 维域中,即可得到 STAP 结构,通过这种方式能够使得抗干扰自由度水平能够得到提高,如果 N 个阵元等距线阵需要进行空时处理,需要延迟 K 个数据,如图 1 所示,信号在不同的时刻抗干扰的自由度不同,如果要提高,则可能产生信号失真问题的。

可将 STAP 信号模型表示如下:

$$X = SX_s + \sum_{i=1}^M J_i + n \quad (1)$$

$X = [x_{11}, x_{21}, \dots, x_{N1}, x_{12}, x_{22}, \dots, x_{N2}, x_{1K}, x_{2K}, \dots, x_{NK}]^T$ 是阵列接收到的空时数据矢量; n 是加性高斯白噪声; $X = [X_0, X_{s1}, \dots, X_{s(K-1)}]^T$ 表示 K 个卫星信号延迟的矢量; J_i 表示干

扰信号 $NK \times 1$ 维矢量。

$$J_i = [j_{i1}(0) \dots, j_{iN}(0) j_{i1}(1) \dots, j_{iN}(1) \dots j_{i1}(K) \dots, j_{iN}(K)]^T \quad (2)$$

其中:

$$S = I_{K \times K} \otimes S_s \quad (3)$$

式(3)为 $NK \times K$ 阶矩阵。

$$S_s = [1 \ e^{2\pi d j \sin \theta / \lambda} \dots e^{2\pi d j (K-1) \sin \theta / \lambda}]^T \quad (4)$$

式(4)表示的是空域导向矢量, d 对应代表了阵元间距,将载波波长以 λ 表示。

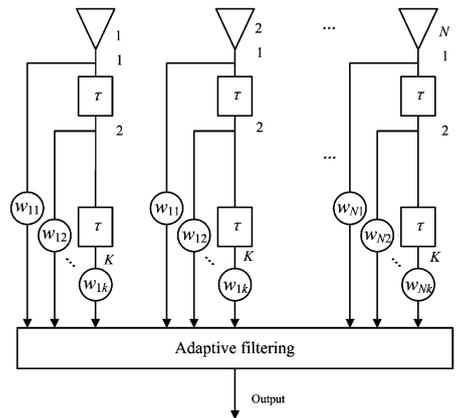


图1 可靠性处理抗干扰原理示意图

STAP 能够实现对干扰问题的有效控制,与此同时,也会使得卫星导航信号受到影响,假设下式表示的是空时权矢量:

$$W = [w_{11} \dots, w_{N1} w_{12} \dots, w_{N2} \dots w_{1K} \dots, w_{NK}]^T \quad (5)$$

则经过 STAP 抗干扰后的阵列输出为:

$$y = W^H SX_s + W^H \sum_{i=1}^M J_i + W^H n \quad (6)$$

对此,如果能够较好的对干扰问题进行抑制,那么此时选择传统的 STAP 方法也无法保证是能够使得全部信号得以有效恢复的,而且此时权值与导向矢量对应乘积并不是 1,得到的结果将会是一个矢量,如果该矢量是 h ,则有:

$$h = W^H S = [h(0) \ h(1) \ \dots \ h(K-1)] \quad (7)$$

利用伪随机信号进行有关运算,是能够获得卫星导航准确定位的,如下所示表示的即为信号与数据相关的函数:

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P(f) H(f) \exp(j2\pi f\tau) df \quad (8)$$

$P(f)$ 是正的,并且以 f 为对称的,如果认为此时 $H(f)$ 不会受到影响,则相应函数应当具有 $t=0$ 的峰值。然而因为 $H(f)$, 会使得相关峰位置有所偏移。或者是相关峰主瓣展宽等,导致最终定位结果缺乏精确性。

2 利奇格网模型平均方法的分析

相关领域的学者已经在卫星导航中 STAP 产生的信号失

真问题进行了广泛的研究,利用串联有限冲击响应(FIR)滤波器^[7]来校正信号失真问题: $G(f) = H^*(f)$,对应的相关函数如下:

$$C'(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P(f) |H(f)|^2 \exp(j2\pi f\tau) df \quad (9)$$

$\tau=0$ 时,相关函数 $C'(\tau)$ 对应峰值是保持不变的,因而,假如是理想状况,则相关函数主瓣展宽,但是考虑到实际中,干扰问题是存在的故此,这时候利用这种方法没有办法获得理想效果,而且因为存在干扰参与,该方法最终将会是失效的。该问题的校正可通过串联逆滤波器实现,而且该方法类似于文献[7],存在的主要区别在于此时 $G(f)$ 变成了 $G(f)H(f) = \delta$,而且通过最小二乘法即可得到 $H(f)$ 的广义逆。并且通过仿真实验还能够得出,如果是理想条件是能够得到较好的效果的,然而,因为干扰残余,导致方法失效。

文献[5]提出可通过维纳滤波器来补偿失真的相关函数,这是类似文献^[7]的,不过干扰残余依旧存在。如果条件并不理想,或者是存在较大干扰时,整体性能将会是下降的,而且文献[5]仿真图10中,如果是利用未补偿方法,此时相关峰值并没有偏移

为了解决如上问题,本文结合可靠性处理原理入手,分析了信号失真问题。

如式(10)所示,代表的即为最为传统的最优处理器:

$$\left. \begin{array}{l} \min W^H R W \\ \text{s. t. } W^H S_T = 1 \end{array} \right\} \quad (10)$$

其中, W 表示 $NK \times 1$ 维的权矢量。

$$W = [w_{11} \ w_{12} \ \dots \ w_{1K} \ w_{21} \ \dots \ w_{2K} \ w_{nK} \ \dots \ w_{NK}]^T \quad (11)$$

$R = E[XX^H]$ 表示协方差矩阵,是基于接收阵列数据能够得到的 $NK \times NK$ 矩阵, S_T 表示2维矩阵导向矢量($NK \times 1$)。

结合式(10),通过拉格朗日乘数法即可得到如下所示的2维的权矢量 W_{opt} 为:

$$W_{opt} = \mu R^{-1} S_T \quad (12)$$

其中, $\mu = 1/(S_T^H R^{-1} S_T)$ 属于常数。

分析式(6),能够得出,如果在某个时刻,导航信号所对应的时刻也是不相同的,而因为不同时刻下,信号对应的编号是不同的,那么如果依旧沿用以往的空时处理方法,最终获得的信号将会是失真的。

结合式(7), $h = W^H S$ 为矢量,假如将式(10)进行修改,得到如下形式:

$$\left. \begin{array}{l} \min W^H R W \\ \text{s. t. } W^H S = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \end{array} \right\} \quad (13)$$

由式(13)便能对导航信号失真问题进行有效解决的,因此,也就是说将利奇格网模型平均方法加入其中,那么在这种情况下,合成信号受到的来自不同时延信号的影响也将被降到最低,也就是说此时式(6)中的信号输出中不再含有延

时信号: $W^H S X_s = X_{s0}$ 。在此时, S 与式(3)的定义是相符的,通过这种方法获得的权值,不仅能够实现对干扰问题的有效消除,还能够过滤掉延迟信号产生的不利影响,假设对应的 $h = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$,对式(13)进行求解能够得到如下所示的最优权值:

$$W_{opt} = \mu' R^{-1} S' \quad (14)$$

将对应式(13)中的约束条件融入到式(14)中,能够得到下式:

$$(\mu' R^{-1} S')^H S = h \quad (15)$$

将式(15)两边都右乘 S^H ,能够得到:

$$S'^H (\mu' (R^{-1})^H S S^H) = h S^H \quad (16)$$

此时,可以求得 S' 为 $NK \times 1$ 维矢量:

$$S' = (h S^H (\mu' (R^{-1})^H S S^H)^{-1})^H \quad (17)$$

其中, μ' 是常数,即:

$$\mu' = h (S'^H (R^{-1})^H S)^{\dagger} \quad (18)$$

“ \dagger ”代表 Moore-Penrose 广义逆。

分析式(17)、式(18)能够发现想要得到 S' 是比较困难的,而且具有较高的复杂度。考虑到 μ' 属于常数,抗干扰效果不会受到较大影响,故此,在对式(17)进行计算时假设 $\mu' = 1$,此外,因为此时无法保证 $(\mu' (R^{-1})^H S S^H)$ 的逆一定是存在的,因而,如果可以进行适当的对角加载,不会对其抗干扰效果产生过大影响。

3 仿真实验

通过仿真实验,可以分析频率、延迟、干扰等影响,具体的参数设置如下:信噪为-15 dB;卫星信号为C/A码,设置的延迟线数为4,利用的单星约束为 Linearly Constrained Minimum Variance, LCMV,如果假设卫星信号对应的来向是零,而且带宽进行的干扰信号压制来向是-30°,并且信号是由下变频进入到中频的,频率大小为1.023 MHz,对应的采样率为4.092 MHz。

实验1通过空域处理与空时处理实验对比,第一种情况,指的是干扰数是3的情况,即此时存在宽带宽干扰一个,以及窄干扰两个,在第二种情况中,合计有4个总干扰,其中一个为宽带宽干扰,剩余的都是窄带干扰。

图2和图3展示的是对情况1处理得到的结果,采用的方法分别为空域处理以及利奇格网模型方法,最终所对应的信号捕获情况。在图2(a)中表示的是对应三维坐标分别为多普勒(0~100单元)。码位(0~100单元)以及相关值的情况,在图2(b)中表示的此时对应2维坐标依次为码位以及归一化相关值。分析图2以及图3能够得出,如果此时对应干扰数是3,那么此时通过两种方法是能够实现对干扰问题的有效抑制的,此时导航信号也是能够准确获得的。

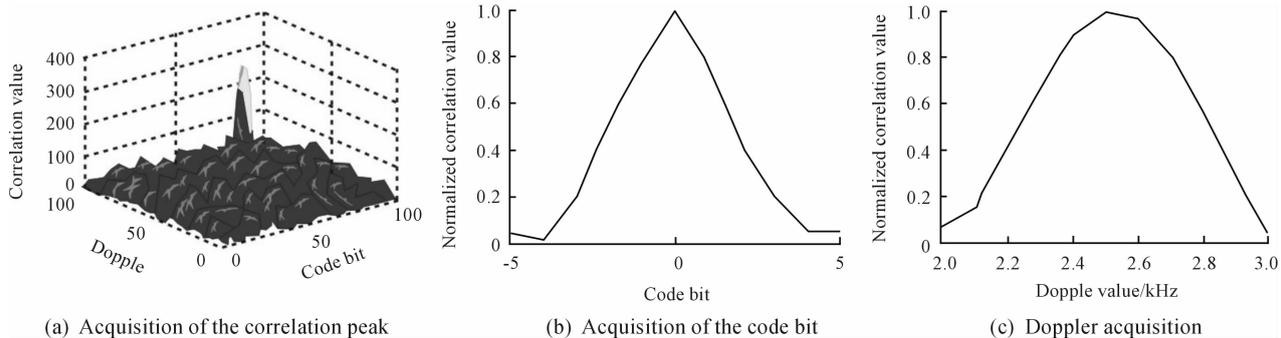


图2 空域处理效果

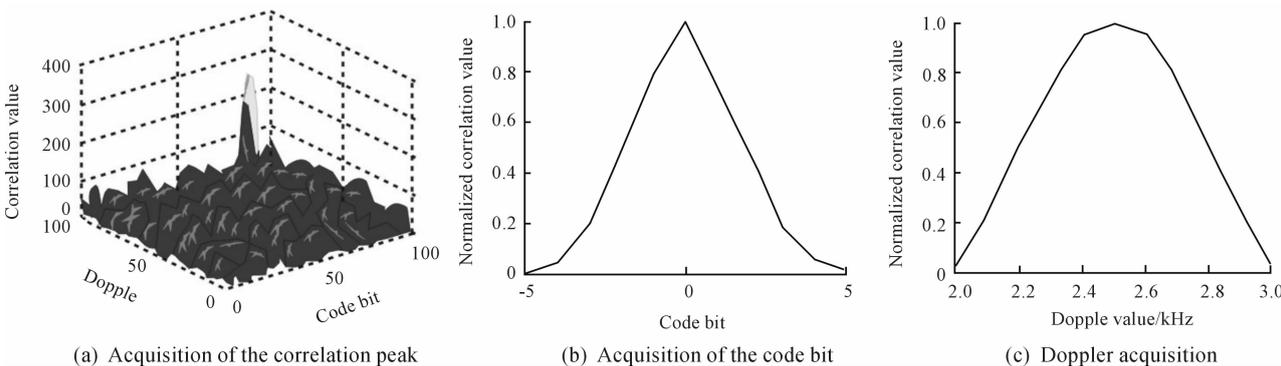


图3 利奇格网模型的处理效果

图4、图5表示的则是利用这两种方法对情况2进行处理时能够得到的信号捕获,分析两图能够得出,如果此时对干扰数是4,那么利用空域处理方法,是很难实现对干扰问题的有效抑制的,也无法进行信号捕获,而且此时获得的捕获信号效果也并不好。但本文所提出的方法因为相对干扰数具有的抗干扰自由度更大,性能不会受到过多影响。

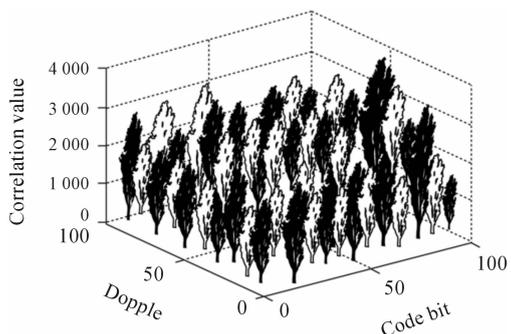


图4 空域处理效果

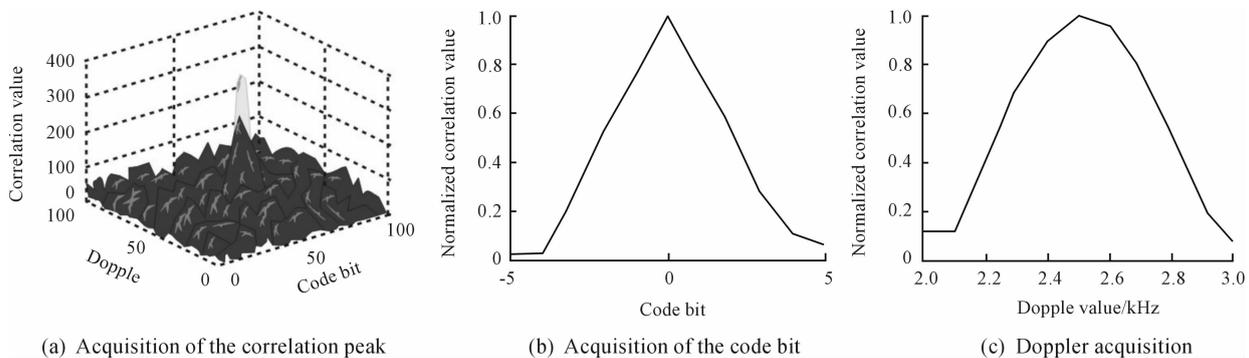


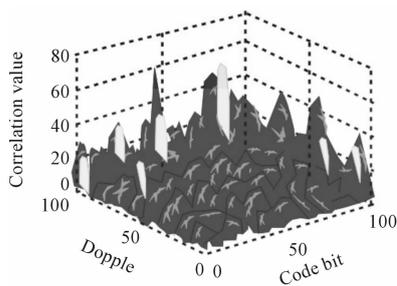
图5 利奇格网模型的处理效果

实验2 不同空时处理方法的对比,利用该实验,将本文方法和几种传统方法进行了对比分析,选择的对比方法分别为四种,第一种方法是并未经过均衡补偿而得到的,其他的两种方法如逆滤波器补偿方法,以及 Fante 方法,最后一种方法即为本文所设计提出的方法。在这里进行对比试验时,也是分了两种情况来进行分析的,区别于前述的第一、第二种情况,将其描述为第三种以及第四种方法,前者指的是在存在信号以及高斯噪声的情况,即此时存在零干扰数,另一种情况则指的是此时存在 3 各窄带干扰以及一个宽带干扰,即对应干扰数是 4。

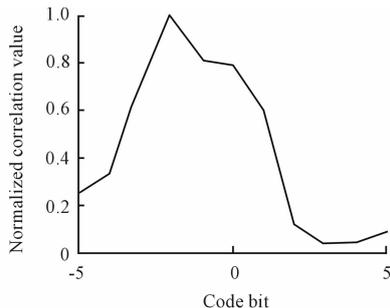
图 6 ~ 图 9 表示的就是在第三种情况下,利用上述四种

方法来进行时空处理,捕获的相关峰情况。分析该图能够发现,在这种情况下,如果是利用未补偿时空处理方法,相关峰将会偏移,假如选择 Fante 方法,相关峰展宽会发生,而且这两种方法下得到的相关峰值都是比较小的。对比来讲,利用另外两种方法得到的结果是较为满意的。

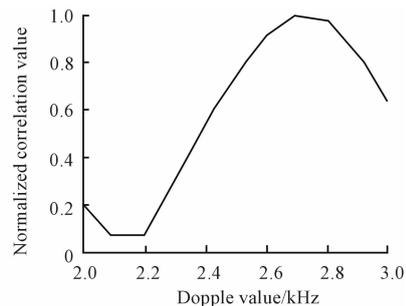
图 10 ~ 图 13 反映了在第四种情况下,分别使用上述方法能够得到的捕获结果,分析诸图能够得出,如果是未补偿可靠行处理方法,最后得到的相关峰会发生偏移的,而且最终也只能获得非常小的相关峰,而如果是 Fante 方法,以及逆滤波补偿方法,是无法得到较好的导航信号的,而利用本文方法在这种情况下,依旧能够获得非常好的捕获结果。



(a) Acquisition of the correlation peak

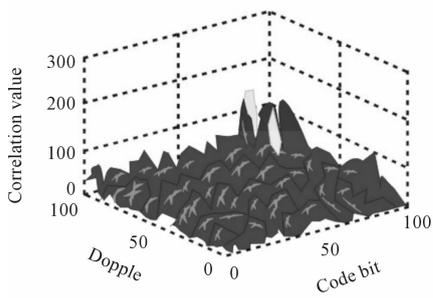


(b) Acquisition of the code bit

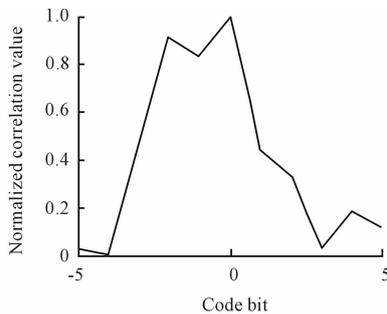


(c) Doppler acquisition

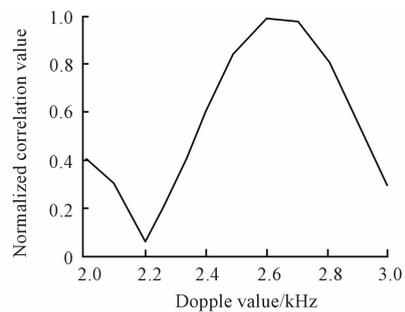
图 6 未补偿的空时处理效果



(a) Acquisition of the correlation peak

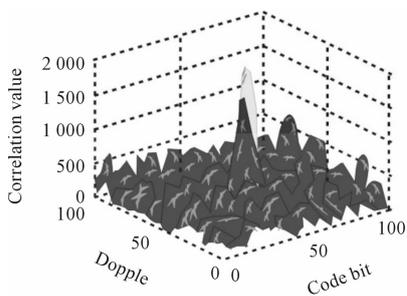


(b) Acquisition of the code bit

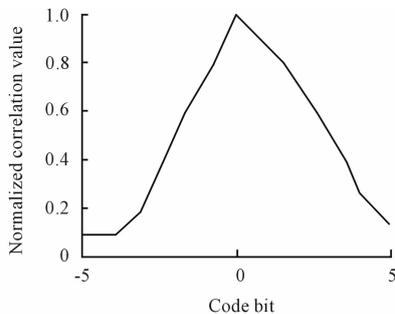


(c) Doppler acquisition

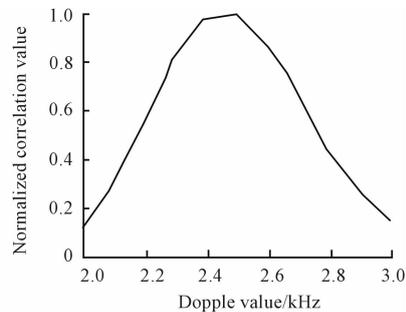
图 7 Fante 补偿方法效果



(a) Acquisition of the correlation peak



(b) Acquisition of the code bit



(c) Doppler acquisition

图 8 逆滤波补偿方法效果

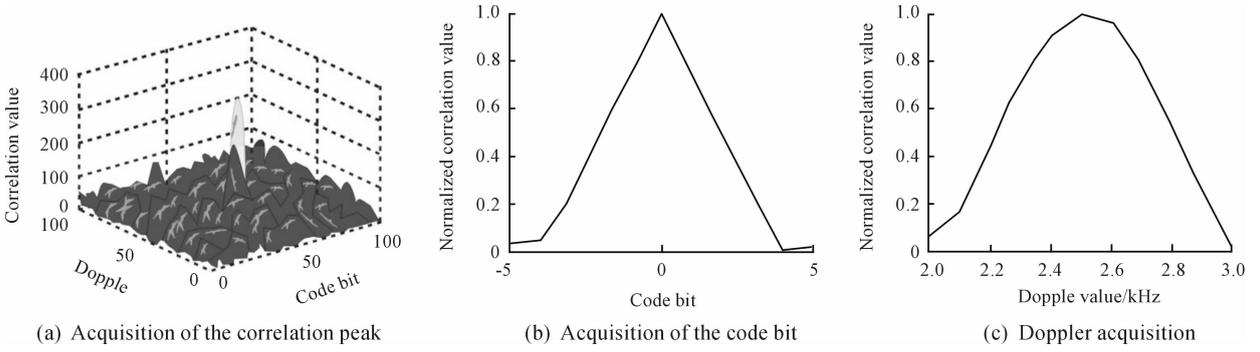


图9 利奇格网模型的处理效果

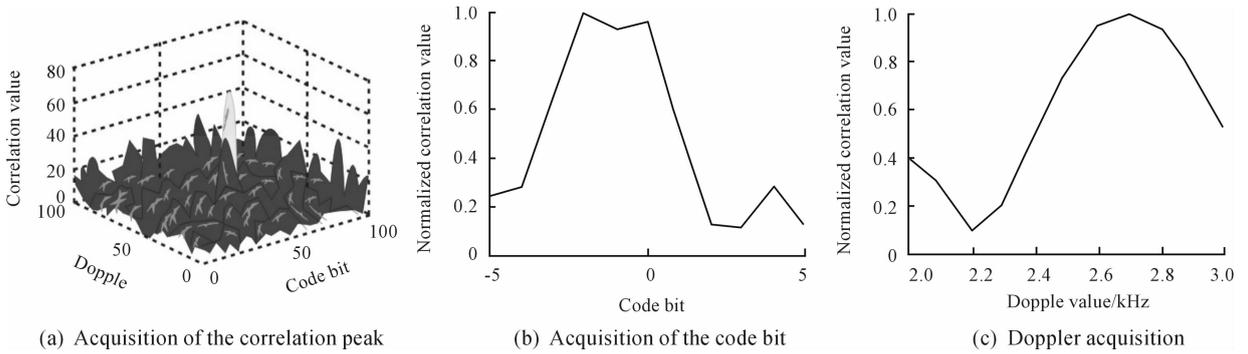


图10 未补偿的空时处理效果

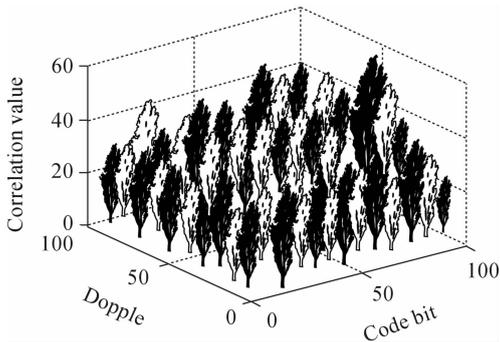


图11 Fante 补偿方法效果

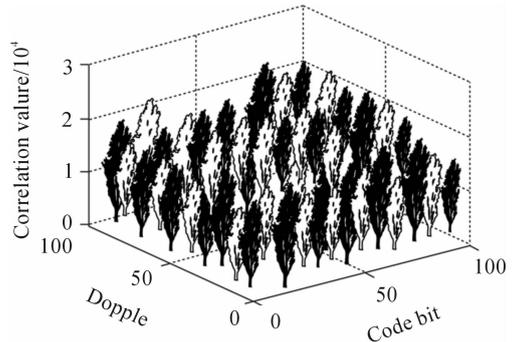


图12 逆滤波补偿方法效果

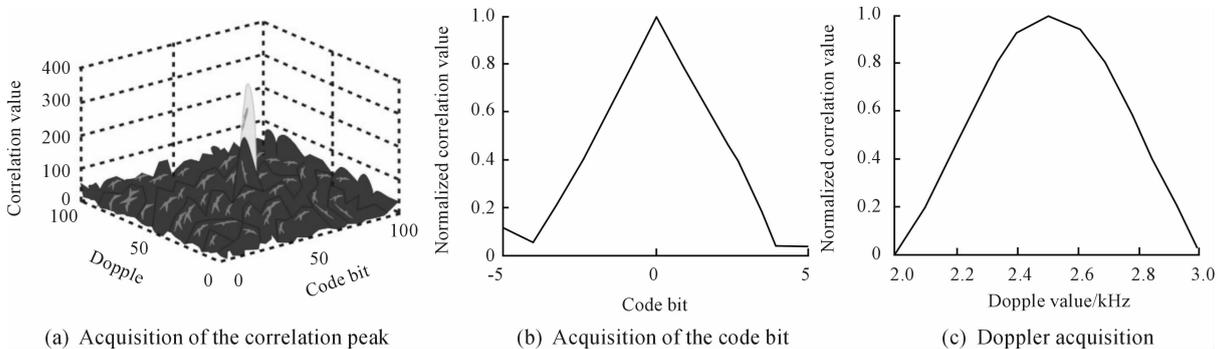


图13 利奇格网模型的处理效果

4 结论

1) 本文主要针对导航信号中,进行可靠性处理能够产生的影响,同时,在信号失真时如何进行有效分析和甄别,与传统可靠性处理方法对比具有明显的优势,提出了利奇格网模型平均方法的可靠性处理方法,能够有效解决卫星导航信号失真问题。

2) 仿真结果表明,该方法可以有效解决卫星导航系统信号失真与抗干扰自由度增加之间的矛盾问题,而且与补偿方法相比,本文采用的方法能够获得更加显著的效果,而且最终效果和可靠性非常高,整个过程是十分简洁、高效的。

参考文献:

- [1] 王建中,杨璐.定向测姿系统的研究[J].电子技术应用,2016,42(9):14-18.
- [2] 周俊,王琳,徐永强,等.惯性导航与卫星导航组合定位精度分析及仿真[J].测控遥感与导航定位,2018,48(12):1086-1090.
- [3] TITERTON D, WESTON J. Strapdown Inertial Navigation

Technology[J]. Aerospace & Electronic Systems Magazine IEEE,2004,20(7):33-34.

- [4] WANG Jianzhong. Vehicle attitude determination system based on vehicle GPS [J]. Revista de la Facultad de Ingeniería U. C. V., 2017,32(7):375-384.
- [5] 马国驹,蔚保国,贾瑞才.INS辅助GNSS高动态捕获跟踪技术研究[J].无线电工程,2016,46(2):23-26.
- [6] 李小芳.激光陀螺捷联惯性导航系统零速修正技术研究[D].北京:北京理工大学,2015.
- [7] 蔡佳楠,孙龙.GPS接收机双模热启动算法[J],中国集成电路,2017,26(5):39-44.
- [8] LIU Z, HUANG L, TANG X, et al. Multipath mitigation strobe for global navigation satellite system receivers[J]. Electronics Letters,2016,52(11):962-963.
- [9] 董春梅,任顺清,陈希军.基于三轴转台误差分析的IMU标定方法[J].系统工程与电子技术,2016,38(4):895-901.
- [10] 郝志涛.北斗卫星导航系统发展与应用[J].电子技术与软件工程,2017(7):34-36.

(责任编辑 杨继森)

(上接第155页)

目前军用飞机电源车在飞行现场无法进行测试的问题,应用前景较好,对其他飞行现场测试装备的研发具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张敏.军用自动测试系统的发展及关键技术[J].航空维修与工程,2015(2):49-51.
- [2] 张树团.通用航空电源综合测试系统设计[J].自动化与仪器仪表,2011(5):48-51.
- [3] 杨妍.电源测试系统的设计和实现[J].现代电子技术,2012(14):98-102.
- [4] 季鹏.基于DSP的电源测试系统的设计与实现[J].核

电子学与探测技术,2009,26(6):874-875.

- [5] GJB572A—2006.飞机外部供电特性[S].
- [6] GJB5189—2003.飞机供电特性测试方法[S].
- [7] 郭慧娟.航空交流电源畸变系数测试方法研究[J].电子设计工程,2014,22(10):141-143.
- [8] LU Hong. Aircraft electrical power system reliability estimation based on pattern importance[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2012,31(3):608-612.
- [9] ZHENG Xiancheng. Measurement method for AC voltage distortion of aircraft power system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2006,38(10):1751-1753.

(责任编辑 唐定国)