文章编号：

高动态条件下 SINS 辅助 GNSS 信号捕获的性能分析

何晓峰[1]，聂祖国[1]，于慧颖[1]，秦海力[2]

（1.国防科学技术大学 机电工程与自动化学院，长沙 410073 2. 总装备部装备管理信息办公室，北京 100035）

摘要：采用 SINS 辅助 GNSS 信号捕获是提高 GNSS 接收机动态性能的有效方法，论文考虑高动态条件下 SINS 的运动相关性，分析了 SINS 辅助卫星信号捕获的性能。仿真结果表明，在典型高动态轨迹下即使采用低精度 SINS 辅助信号捕获，也能有效提高捕获的灵敏性。采用 100 deg/h 精度的陀螺与 1 mg 精度的加速度计组成的 SINS 进行辅助，GNSS 信号捕获灵敏性至少能够提高 4.2 dB，并且减小了平均捕获时间。

关 键 词：全球卫星导航系统；捷联惯性导航系统；信号捕获；辅助；高动态；性能分析

中图分类号：U666.1，V241.62 **文献标识码：**A

Performance Analysis of High Dynamic Signal Acquisition with the Aid of SINS for GNSS Satellites

HE Xiao-feng[1], NIE Zuguo[1] , YU Huiying[1], Qin Haili [2]

(1. College of Mechatronics and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073

2. Equipment Management Information Center, General Department of Equipment, Beijing 100035)

Abstract: GNSS receiver dynamic performances of signal acquisition can be improved with the aid of SINS. Performance analysis of SINS aided acquisition based on motion dependence of SINS performance is evaluated in the high dynamic situation. Simulation experiments illustrate that aided acquisition method with SINS composed of 100 deg/h bias drift gyros and 1 mg bias drift accelerometers can enhance the sensitivity of probability of detection up to 4.2 dB-Hz compared with unaided acquisition. At the same time, average acquisition time is decreased greatly.

Key words: GNSS, SINS, Signal Acquisition, Aid, High Dynamic, Performance Analysis

GNSS(Global Navigation Satellites Systems)接收机已逐渐成为民用车辆、军用武器平台、精确制导武器的标准导航装置之一。美国公共法案规定，2000年9月30日之后，国防部任何飞机、舰船、装甲车辆以及非直接火力武器系统，如果不配备GPS接收机，将不能获得采购或技术改进资金。因此，应用于飞机、制导武器等的GNSS接收机必须满足高动态、高抗干扰能力的要求[1]。而卫星信号捕获是实现接收机高动态快速导航定位的基础和重要前提，目前提高信号捕获动态性能的方法主要分为两类，第一类主要着眼于接收机内部的信号处理算法改进[2, 3]；第二类采用外界信息辅助的信号捕获方法，典型的是采用捷联惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System，SINS)辅助信号捕获[4, 5]。

由于GNSS/SINS组合导航的广泛应用，SINS辅助的信号捕获方法受到众多学者青睐。高动态条件下，由于载体运动速度、加速度较大，使载体与卫星之间的多普勒频移和多普勒频移率变化较快，导致信号捕获的搜索范围成倍增加，使捕获更为困难。若使用SINS辅助接收机进行信号捕获，可以利用SINS提供的多普勒频移先验信息，大大缩小多普勒频移的搜索范围，使接收机采用常规捕获方法就能成功捕获高动态信号。国内外许多研究机构对此展开了深入的研究，系统分析了SINS辅助信号捕获的性能，但是前提是假设SINS导航精度与运动无关的[6, 7]。实际上，SINS具有明显的运动相关性，在不同的动态条件下，SINS导航精度将不同[8]，因此，基于SINS运动相关性的信号捕获性能分析更贴近实际，具有更实际的应用意义。

1 SINS 辅助信号捕获的基本原理

SINS辅助信号捕获的基本原理是SINS通过导航解算能够得到当前时刻的载体速度、加速度信息，结合卫星历书或者

收稿日期：2011-03-10；**修回日期：**

基金项目：国家 863 计划资助（2006AA12Z319）；高等学校博士学科点专项科研基金资助（20069998009）

作者简介：何晓峰（1979—），男，博士，讲师，从事微惯导组合、卫星导航和组合导航技术研究。 E-mail：hexf_lit@126.com 电话：0731-4576305-8204，13755017044

星历，计算得到载体至卫星视线方向的相对速度，从而估计视线方向的多普勒频移和多普勒频移率，驱动接收机的数控振荡器(NCO)产生本地码和载波频率，再按照常规信号捕获方式进行相干或非相干捕获，如图1所示。

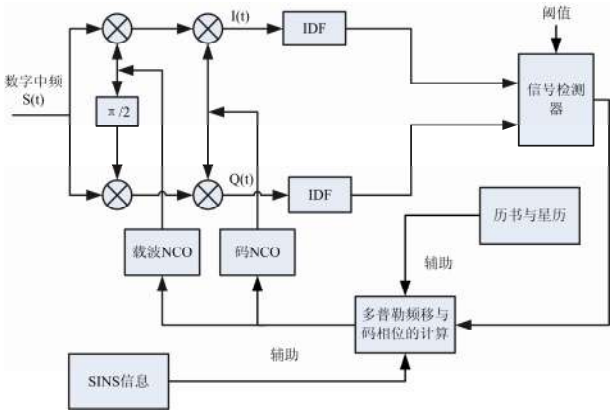

图 1 SINS 辅助 GNSS 信号捕获的原理

Fig.1 GNSS Signal Acquisition with the Aid of SINS

图1中的输入信号为经过下变频处理后的数字化中频信号

$$S(t) = AD(t)C\left[(1+\frac{f_{\mathrm{d}}}{f_{\mathrm{L}}})t-\tau\right]\cos[2\pi(f_{\mathrm{IF}}+f_{\mathrm{d}})t+\phi]+n(t) \tag{1}$$

其中，A 为信号的幅度；$C[\square]$ 为伪随机码，$D(t)$ 为数据码，$n(t)$ 为等效输入带限白噪声，f_{L} 为载波L频段的中心频率，τ 为码相位延迟，ϕ 为载波相位（ϕ_0 为初始载波相位），$f_{\mathrm{IF}}=\omega_{\mathrm{IF}}/2\pi$ 为数字中频频率，$f_{\mathrm{d}}=\omega_{\mathrm{d}}/2\pi$ 为输入信号在 t 时刻的多普勒频移。本地信号与输入信号相关后，通过预检测积分时间为T的积分清零后得到同相（I）和正交相（Q）信号，如下式

$$\begin{cases} I_k = \int_{(k-1)T}^{kT} I(t)dt \\ Q_k = \int_{(k-1)T}^{kT} Q(t)dt \end{cases} \tag{2}$$

卫星导航系统中产生多普勒频移的因素主要有卫星与载体的相对运动、接收机钟差漂移率和卫星钟差漂移率。由于后两项容易计算或者拟合得到，而且产生的多普勒频移相对于相对运动产生的多普勒频移小得多，因此主要考虑卫星与载体的相对运动产生的多普勒频移，计算公式如下

$$f_d = \frac{f_L}{c}(V_{rx}-V^s)\cdot\vec{e} = \frac{1}{\lambda}(V_{rx}-V^s)\cdot\vec{e} \tag{3}$$

其中，V_{rx} 为载体速度向量，V^s 为卫星速度向量，$\vec{e}$ 为星站视线方向的单位方向矢量，λ 是信号波长。

若假设卫星速度由星历计算得到，在讨论载体速度误差对于多普勒频移误差影响时，忽略卫星速度误差。于是，根据(3)得到多普勒频移的方差为[9]

$$\sigma_{f_p}^2 = \frac{\vec{e}\cdot E(\delta V_{rx}(\delta V_{rx})^T)\cdot\vec{e}^T}{\lambda^2} \tag{4}$$

由此可见，SINS估计的速度误差决定了多普勒频移误差的大小，从而也决定了提高捕获性能的程度。

2 考虑 SINS 运动相关性的捕获性能分析

2.1 SINS 运动相关性分析

在ECEF系下，SINS的导航误差方程为

$$\dot{X}^e(t)=\begin{bmatrix}\delta\dot{R}^e\\ \delta\dot{V}^e\\ \dot{\varepsilon}^e\\ \delta\dot{\omega}^b\\ \delta\dot{a}^b\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta V^e\\ -F^e\varepsilon+C_b^e\delta a^b-2\Omega_{ie}^e\delta V^e+N^e\delta R^e\\ -\Omega_{ie}^e\varepsilon^e+C_b^e\delta\omega^b\\ -A\delta\omega^b+W_\omega\\ -B\delta a^b+W_a\end{bmatrix} \tag{5}$$

其中，δR^e、δV^e、ε^e 分别为位置误差向量、速度误差向量、失准角向量；$\delta\omega^b$ 与 δa^b 分别为陀螺误差向量与加速度计误差向量；F^e 为比力在ECEF中的反对称矩阵；C_b^e 为从体坐标系转到ECEF系的方向余弦矩阵；A、B分别为陀螺、加速度计的误差系数矩阵；Ω_{ie}^e 为地球自转角速度 ω_{ie}^e 的反对称矩阵；N^e 为与位置、地球自转角速度相关的系数矩阵，详见参考文献[6]。

在式**错误！未找到引用源。**的速度误差方程中，对于低精度SINS而言，忽略 Ω_{ie}^e 和 N^e（N^e 为 10^{-6} 量级）的影响，则得到近似条件下的速度误差

$$\delta V^e=-(\int F^e(\int C_b^e d\tau)dt)\delta a^b+(\int C_b^e dt)\delta\omega^b \tag{6}$$

由式(6)可知，SINS导航解算过程中的速度误差与陀螺误差、加速度计误差、滤波周期、姿态矩阵和加速度计测量得到的比力值有关，而比力值是与载体加速度值和当地重力加速度相关，所以，速度误差与载体动态性相关。即使是对于简化后的速度误差方程直接求解也难以得到解析解，需要结合运动轨迹来分析载体动态性对于惯导速度误差的影响。将式(6)代入式(3)能够得到SINS速度误差与多普勒频移误差的解析式。

如图2所示，比较了静态与动态条件下导航级SINS系统的真实北向速度误差。很明显，在动态条件下的速度误差增大更快，100秒动态条件下的北向速度误差达到了0.35 m/s，而相同时间静态条件的北向速度误差优于0.1 m/s。

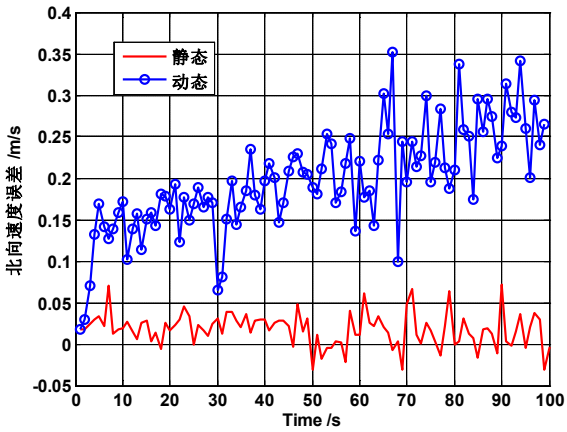

图 2　静态与动态条件下 SINS 速度误差比较

Fig.2　Comparison of SINS errors between static and dynamic conditions

2.2 捕获灵敏度

采用 K 个累计数目的非相干捕获的检测信号 $Z(k)$ 计算为[10]

$$Z(k)=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\sqrt{I_k^2+Q_k^2} \tag{7}$$

当有信号存在时，$I_k^2+Q_k^2$ 服从自由度为2的非中心 χ^2 分布，非中心参数为 A^2，可以推导得到单次检测概率

$$P_d=\int_{\tau_1}^{\tau_2}F(\tau)\cdot\int_{V_t}^{\infty}\frac{1}{2}\left(\frac{Z}{2K\beta(\tau)}\right)^{\frac{K-1}{2}}\exp\left[\frac{(-Z-2K\beta(\tau))}{2}\right]I_{K-1}(\sqrt{2K\beta(\tau)Z})dZd\tau \tag{8}$$

其中，$\beta(\tau)=\left(A_0\cdot R(\tau)\right)^2/\left(2\sigma_n\right)^2$，$A_0=A\square M_E D(k)R\left[\delta\tau(k)\right]\cdot\sin c(\pi\Delta f_d T)/\sqrt{2}$，$\sin c(x)=\sin x/x$，其它参数详见参考文献[6]。

非相干积分之后信噪比为

$$c/n_{nc}=\frac{\pi}{4-\pi}\{\exp(-A_0^2/4)[(1+A_0^2/2)I_0(A_0^2/4)+\frac{A_0^2}{2}I_1(A_0^2/4)]-1\}^2 \tag{9}$$

其中，$I_0(x)$、$I_1(x)$分别为零阶、一阶修正的Bessel函数。

捕获的灵敏度是指在基于采用的捕获方法及其参数，能够满足信号检测概率的载噪比最小值。因此，捕获的灵敏度可以用使检测概率达到预设值的C/N值来表示，灵敏度越高意味着能够以相同检测概率检测到信噪比更低的信号。如图3所示为多普勒频移误差对于检测概率的影响曲线，可知当多普勒频移误差小于200 Hz时，对于检测概率的影响较小；当误差大于200 Hz时，检测概率降低较大。因此，SINS速度误差精度通过多普勒频移误差来影响信号捕获的检测概率，从而影响捕获的灵敏度。

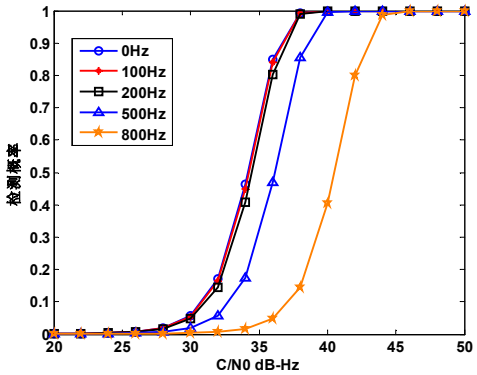

图 3 多普勒频移误差对于检测概率的影响

Fig.3 Influences of Doppler Frequency Errors on Probability of Detection

2.3 捕获时间

捕获时间T_{acq}是指搜索并捕获到卫星信号所需要的时间。由于T_{acq}是随机变量，一般用平均捕获时间$\overline{T}_{acq}$表示捕获特性。单次判决算法的平均捕获时间$\overline{T}_{acq}$可通过检测概率P_d、虚警概率P_{fa}得到

$$\overline{T}_{acq}=\frac{2+(2-P_d)(q-1)(1+L_cP_{fa})}{2MP_d}KT \tag{10}$$

其中，L_c为在无信号搜索单元由虚警所带来的时间损耗系数；q为不确定区域的大小；M为并行搜索通道数。

SINS辅助捕获方法一方面将提高检测概率，另一方面减小了不确定区域的大小，根据式(10)可知能够有效的降低平均捕获时间。

3 仿真实验与分析

假设载体相对于某颗卫星视线方向做高动态匀加速直线运动，速度为2000 m/s，加速度为100 m2/s，姿态角均为0 deg，初始速度误差为0.3 m/s，初始对准姿态角误差均为0.1 deg。采用的低精度SINS的陀螺零偏稳定性为100 deg/h，加速度计零漂稳定性为1 mg。GNSS系统采用GPS系统，针对1.023 MHz的C/A码的信号捕获进行讨论。

若采用该低精度SINS辅助进行信号捕获，信号检测采用式**错误！未找到引用源。**的非相干捕获方法，预检测积分时间为10 ms，则如图4所示为时间与信噪比影响检测概率的三维曲线。由图可知，当SINS单独导航某一时刻时，信噪比越高，检测概率越高，说明信号越强越容易捕获到信号；当信噪比一定，随着SINS独立工作时间越长，速度精度逐渐降低，检测概率越低。

如图5所示，当SINS单独工作120 s时，单次检测概率为0.95时，比较了SINS辅助与无辅助的捕获灵敏度。SINS辅助的灵敏度为37.2 dB-Hz，而无辅助时的灵敏度为41.4 dB-Hz，因此如表1所示，采用SINS辅助的捕获灵敏度提高了4.2 dB-Hz。

在捕获过程中，令频率搜索步长为500 Hz，码相位搜索步长为0.5个C/A码，则在无辅助捕获时二维搜索单元数目为

$$q_{unaid}=\frac{2\times15\times10^3\times1023}{500\times0.5}=122760 \tag{11}$$

其中，为了满足大多数运动载体的范围，多普勒频移搜索范围选为[-15 KHz, 15 KHz]。

SINS工作120 s进行辅助捕获时，二维搜索单元数目为

$$q_{aid}=\frac{2\times(5\times10^3+3\times48)\times1023}{500\times0.5}=42098 \tag{12}$$

其中，卫星运动的多普勒频移搜索范围选为[-5 KHz, 5 KHz]，SINS速度误差带来的多普勒频移不确定度为48 Hz（1σ），上式取3σ。

在SINS辅助条件下，当信噪比为40 dB-Hz，单次检测概率0.95，虚警概率为0.1时，平均捕获时间为24 s；而无辅助条件下平均捕获时间为69 s。因此，SINS辅助的平均捕获时间相对于无辅助大大减小了。

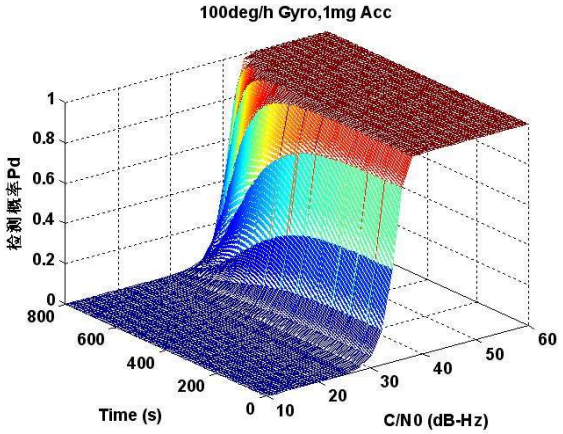

图 4 预检测积分时间 10 ms，100 deg/h 陀螺、1 mg 加速度计的 SINS 辅助捕获的性能曲线

Fig.4 Detection Performance of SINS(Composed of 100 deg/h Accuracy Gyro, 1 mg Accuracy Accelerometer) Aided Acquisition with 10 ms Pre-detection Integration Time

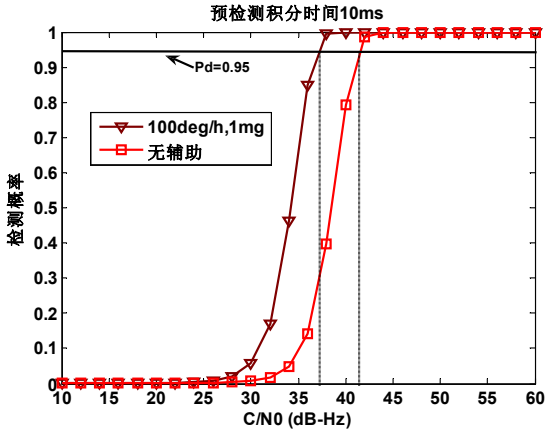

图 5 检测概率 0.95 时 SINS 辅助与不辅助时的捕获灵敏度对比

Fig.5 Sensitivity Comparison of SINS Aided/Unaided Signal Acquisition

表 1 SINS 辅助的捕获灵敏度比较

Tab.1 Sensitivity Comparison of SINS Aided Acquisition

性能	SINS 辅助	无辅助
捕获灵敏度(dB-Hz)	37.2	41.4
灵敏度提高(dB-Hz)	4.2	—

4 结论

论文研究了考虑SINS运动相关性时的SINS辅助卫星信号捕获的性能分析，通过典型高动态轨迹验证了采用SINS辅助捕获的有效性，仿真结果表明，即使采用低精度SINS工作120 s时进行辅助捕获，相对于无辅助捕获仍能够提高4.2 dB-Hz的捕获灵敏度，而且降低了平均捕获时间。在此基础上，继续开展SINS辅助卫星信号跟踪的性能分析研究，以及深入进行GNSS/SINS深组合导航系统的应用研究对于提高精确制导武器的战技指标具有重要的现实意义。

虽然本文研究是基于GPS系统进行讨论，但是对于GNSS系统，特别是我国正在大力建设的Compass卫星导航系统同样具有理论与应用意义。

参考文献(Reference):

[1] 张伯川, 张其善, 常青. 高动态接收机的温启动快捕问题研究. 电子学报, 2005. 33(3): 530-533.
ZHANGBo chuan ,ZANGQi shan ,CHANGQing, A Satellite s Signals Quick Acquisition Algorithm for the High Dynamic GPS Receivers in Warm Start[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2005. 33(3): 530-533.
[2] 李小民. 高动态环境 GPS 应用中的几个关键问题研究. 博士学位论文. 北京: 北京航空航天大学, 1999.
Li Xiaomin. Research on the Key Issue about High Dynamic GPS Receiver[D]. Ph.D Thesis, Beijing: Beijing university of Aeronautics and Astronautics,1999.
[3] 张一, 张中兆, 沙学军. 高动态单频干扰环境下的 FFT 直扩捕获方案. 哈尔滨工业大学学报, 2007. 39(9): 1431-1435.
ZHANG Yi, ZHANG Zhongzhao, SHA Xuejun. An FFT based DSSS acquisition strategy in high dynamic[J]. JOURNAL OF HARB IN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2007. 39(9): 1431-1435.
[4] LI, P., WANG, J., FENG, Z. GNSS/pseudolite signal re-acquisition with the aid of INS in short signal blockage scenarios. Int. Symp. on GPS/GNSS. Yokohama, Japan, 2008. 716-721.
[5] 于海亮, 胡小平, 唐康华. 惯性信息辅助高动态接收机捕获问题的研究. 航天控制, 2008. 26(5): 50-54.
YU Hai-liang, HU Xiao-ping, TANG Kang-hua Research on Acquisition Issues of the High Dynamic GPS Receivers Aided by Inertial Information[J]. Aerospace Control, 2008. 26(5): 50-54.
[6] 唐康华. GPS/MIMU 嵌入式组合导航关键技术研究. 博士学位论文. 长沙 国防科技大学,2008.
Tang kanhua. Research on the Key Technology of Embedded GPS/MIMU Integrated Navigation[D]. Ph.D Thesis, Changsha: National University of Defense Technology,2008.
[7] Gao, G. INS-Assisted High Sensitivity GPS Receivers for Degraded Signal Navigation. Ph.D. thesis. Calgary,Alberta,Canada: University of Calgray,2007.
[8] D.H.Titterton, J.L.Weston. Strapdown Inertial Navigation Technology:Second Edition: AIAA Inc., 2004.
[9] Alban, S. Design and Performance of a Robust GPS/INS Attitude System for Automobile Applications. Ph.D thesis. Palo Alto, California: Standford Unviersity,2004.
[10] Borio, D., Akos, D. Noncoherent Integrations for GNSS Detection: Analysis and Comparisons. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009. 45(1): 360-375.