

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003582

无人机航测高精度 RTK 接收机信号捕获与跟踪仿真方法研究*

邓耀华 姚可星 孙成 郭承旺

(广东工业大学 机电工程学院 广州 510006)

摘要:近年来以载波相位差分技术为核心的实时动态(real-time kinematic, RTK)高精度卫星定位技术在测绘领域迅速发展,基于RTK定位原理,以轻小型化、高精度、稳定快速卫星定位接收机为目标,研究无人机RTK接收机的多系统多频段全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)信号处理技术,包括GNSS多射频前端处理、基带信号处理关键技术。通过专业仿真手段可以得出设计的射频前端接收灵敏度高于 -130 dBm,对6758个采样点搜索捕获的执行时间仅为0.68 s,捕获频移误差约为多普勒频移的0.932%,载波跟踪稳定后频率误差基本集中在0.75 kHz以下。仿真结果表明,设计的GNSS信号处理模块符合实际的多频RTK定位接收机要求。

关键词:无人机航测;RTK;多频接收机;GNSS射频前端;GNSS基带信号处理

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Research on simulation method of signal acquisition and tracking of UAV aerial survey high precision RTK receiver

Deng Yaohua Yao Kexing Sun Cheng Guo Chengwang

(Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In recent years, the real-time kinematic (RTK) high-precision satellite positioning technology with carrier phase difference technology as the core has developed rapidly in the field of surveying and mapping. This article is based on the RTK positioning principle, aiming at light and miniaturization, high precision, stable and fast satellite positioning receivers, the focus is on multi-system and multi-band Global Navigation Satellite System (GNSS) signal processing technology, including the GNSS multi-frequency RF front-end processing and baseband signal processing key technologies of the UAV RTK receiver. Through professional simulation methods, it can be concluded that the designed RF front-end receiving sensitivity is higher than -130 dBm. The execution time for searching and capturing 6758 sampling points is only 0.68 s, and the capture frequency shift error is about 0.932% of the Doppler frequency shift, and the frequency error after the GNSS signal carrier tracking stabilizes is basically concentrated below 0.75 kHz. The simulation results show that the designed GNSS signal processing module meets the requirements of the actual multi-frequency RTK positioning receiver.

Keywords: UVA; RTK; multi-frequency receiver; GNSS RF front-end; GNSS baseband signal processing

0 引言

近年来以载波相位差分技术为核心的实时动态(real-time kinematic, RTK)高精度卫星定位技术在测绘领域迅速发展,无人机搭载RTK定位技术,可极大提升无人机航测的作业精度与速度^[1]。随着美国GPS、俄罗斯GLONASS的现代化建设,欧洲Galileo以及我国北斗

系统的日益成熟,支持多系统多频段的卫星导航接收机已然成为一种大趋势^[2-4]。能够兼容处理多系统多频段的GNSS信号,是无人机航测实现连续、快速、精确RTK定位的保障,同时无人机航测用导航接收机应朝着轻型化、高集成度、低成本的方向发展。

王忠等^[5]从整体结构方面设计了L1/L2/L5三个频段民用信号的GPS单系统接收机;王亚平等^[6]设计了一种以Cortex-M3微处理器为控制平台的能够兼容我国

BD2 导航系统的 GPS 卫星接收机。连接 FPGA 作为接收机的数字基带处理芯片,通过软件编程的方法选择 GPS 或 BD2 模式。刘国燕等^[7]等提出兼容 BDS/GPS/GLONASS 三系统八频点数据的多星座接收机设计方法,接收机利用 ARM9 处理器搭建嵌入式硬件平台,完成 Linux 操作系统移植裁剪,并集成我国自主的 GNSS 板卡(UB380)。

本文基于 RTK 定位原理,以轻小型化高精度、稳定快速卫星定位接收机为目标,重点研究多系统多频段 GNSS 信号处理技术。对 GNSS 多频射频前端处理、GNSS 基带信号处理关键技术展开论述,通过专业仿真手段分析各模块设计的特性,验证无人机 RTK 定位系统的航测性能。

1 实现原理

接收机信号处理主要包括射频前端模拟信号处理、中频基带数字信号处理和导航解算三部分,射频前端处理模块主要完成从天线接收的卫星射频模拟信号到数字信号的转换,过程包括滤波、放大和下变频以及 AD 转换;然后由中频基带信号处理模块,对经过模数转换之后的 GNSS 数字信号进行捕获、跟踪以及导航电文解调;最后导航解算模块对基带解调过后得到的导航电文进行位置、速度以及时间的计算。GNSS 信号的工作频段都集中于 1 164~1 300 MHz,1 559~1 610 MHz,间隔小甚至在部分频段上发生了重叠,但是由于采用不同的调制方式,彼此并不会出现明显的相互干扰^[8]。对四大导航卫星的信号结构进行分析,各卫星导航系统的信号调制存在一定的差异,但同时也有很多共同点,即 GPS、GALILEO、北斗都采用 CDMA 方式来实现多址,GLONASS 第三代系统保留了 FDMA 方式的前提下也播发 CDMA 信号,即四大卫星导航系统都使用了伪码。而 GNSS 信号的捕获时是根据伪码的自相关性和互相关性来确定,而跟踪是在捕获的基础上完成,因此捕获和跟踪的方法对于四大导航卫星信号而言存在一定的相似性,故后文主要以 GPS L1 频点信号处理为主。

2 模块设计

2.1 多频 GNSS 射频前端系统设计

多频 GNSS 射频前端系统设计方案如图 1 所示,采用低功耗、易集成的正交下变频的低中频结构设计,可处理频段覆盖 GPS 的 L1/L5、Galileo 的 E1/E5a、GLONASS 的 G1 以及北斗三号的 B2a。噪声系数小的低噪放尽量靠近天线侧,整个系统共用此低噪放。三路功分器将低噪放后的 GNSS 信号等分为三路,以下分别代称为 L1、

G1、B2 通道。首先由 3 个声表面射频带通滤波器进行通道分离,每条链路都有三级放大器,分别是变频前的射频放大器、变频后的中频放大器以及 VGA,以此保证系统链路的固定增益与动态增益。L1 与 G1 通道使用同一本振频率, B2 通道则采用不同本振频率。下变频采用正交混频,其后接复数滤波器进行镜像抑制,最终经放大后由中频滤波器选频,输出到 ADC 进行采样处理。

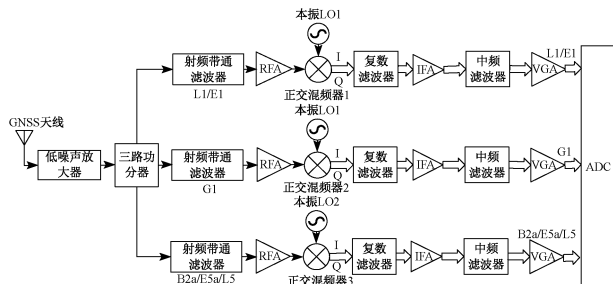


图 1 多频 GNSS 信号接收机射频前端总体方案

Fig. 1 Multi-frequency GNSS signal receiver RF front-end overall scheme block diagram

2.2 GNSS 基带信号处理

基带信号处理模块主要分为两个过程来实现,即 GNSS 信号的捕获和跟踪。捕获即完成被捕获卫星信号参数(载波的频移和码相位偏移)粗略估计;然后得到卫星参数的估值进入跟踪模块完成参数的精确计算,得到相应卫星的测量值和导航电文的解调信息,最终才能实现定位的解算^[9]。

1) GNSS 信号捕获

无人机航测为动态作业,为提高其在航测时的捕获速度,采用并行码相位搜索法,是在两次傅里叶变换的基础上进行^[10-11]。

信号的捕获基于卫星所调制信号中 C/A 码的自相关性和互相关性,其自相关性取值满足式(1)。

$$R_c(\tau) \in \left\{ 1, \frac{\beta(n) - 2}{N}, \frac{-1}{N}, \frac{-\beta(n)}{N} \right\} \quad (1)$$

式中: $R_c(\tau)$ 为 C/A 码的自相关函数; N 表示 C/A 码的长度; n 为本地码发生器对应移位寄存器的位数。其中:

$$\beta(n) = 1 + 2^{\frac{n+2}{2}} \quad (2)$$

其互相关性函数满足式(3)取值范围。

$$R_{c_1, c_2}(\tau) \in \left\{ \frac{\beta(n) - 2}{N}, \frac{-1}{N}, \frac{-\beta(n)}{N} \right\} \quad (3)$$

可知 C/A 码的自相关函数 $R_c(\tau)$ 有 4 个可能值,而互相关函数 $R_{c_1, c_2}(\tau)$ 的取值范围为 3 个,并且其出现的概率不等,分别为 0.125、0.75、0.125。并行码相位搜索捕获过程如图 2 所示。

由本地振荡器生成同相和正交两支路的载波,两个支路分别与输入的中频信号进行相乘,并对其相乘的结

果进行快速傅里叶变换 (FFT), 转换到频域进行相关运算^[12]。然后对本地伪码发生器产生的伪码进行 FFT 变换, 且取其共轭与两支路变换的结果相乘。最后将结果通过傅里叶逆变换 (IFFT) 转到时域并取模的平方, 平方值超过门限值则证明其捕获成功。

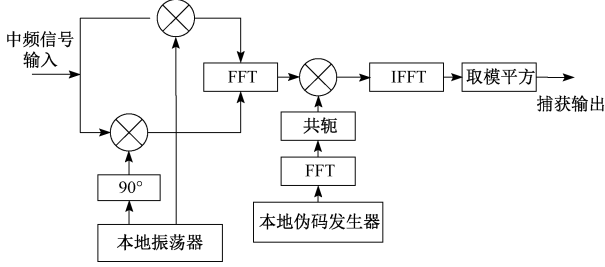


图 2 并行码相位搜索捕获过程

Fig. 2 Parallel code phase search acquisition diagram

2) GNSS 信号的载波跟踪

信号跟踪首先进行载波跟踪, 将信号从中频信号中剥离, 并获得信号的多普勒频移。采用 Costas 环来完成信号的载波跟踪, 载波环路构成如图 3 所示。

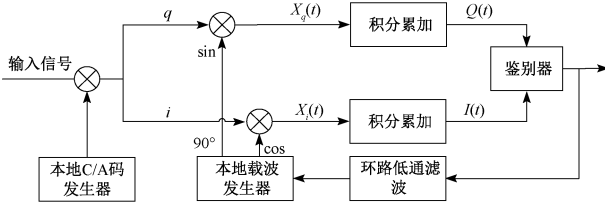


图 3 载波跟踪环路构成

Fig. 3 Component of carrier tracking loop

载波环路接收到的卫星信号如下:

$$s(t) = AC(t)D(t) \cos(\omega_i t + \theta_0) + n_i(t) \quad (4)$$

式中: A 为卫星信号的幅值; $C(t)$ 为伪随机码; $D(t)$ 为信号的导航电文数据; ω_i 是中频信号的载波频率; θ_0 为载波信号的初始相位; $n_i(t)$ 是系统内的噪声分量。当本地码相位与接收信号的码相位对齐时, 即 $\hat{C}(t)C(t) = 1$, 则得到解扩频后的信号如下:

$$s(t)C(t) = AD(t) \cos(\omega_i t + \theta_0) + n(t) \quad (5)$$

再让其与本地载波发生器产生两路信号进行相乘, 可得:

$$X_i(t) = AD(t) \cos(\omega_i t + \theta_0) \cos(\omega_i t + \theta) + n(t) \cos(\omega_i t + \theta) \quad (6)$$

$$X_q(t) = AD(t) \cos(\omega_i t + \theta_0) \sin(\omega_i t + \theta) + n(t) \sin(\omega_i t + \theta) \quad (7)$$

而噪声包括两个支路的分量如下:

$$n(t) = n_c(t) \cos(\omega_i t + \theta_0) + n_s(t) \sin(\omega_i t + \theta_0) \quad (8)$$

经过积分累加滤除两路信号当中的高频分量, 得到

式(9)、(10)的两支路信号。

$$I(t) = ATD(t) \cos\phi + N_c \cos\phi - N_s \sin\phi \quad (9)$$

$$Q(t) = ATD(t) \sin\phi + N_c \sin\phi + N_s \cos\phi \quad (10)$$

T 为积分累加的时间, $\phi = \theta - \theta_0$ 即相位角差, N_c 和 N_s 为高斯白噪声, 如下:

$$N_c = \int_0^T n_c(t) dt \quad (11)$$

$$N_s = \int_0^T n_s(t) dt \quad (12)$$

再将两路积分累加后的信号 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 输入到鉴别器中, 即两路信号相乘得到:

$$Z(t) = I(t)Q(t) = \frac{1}{2} A^2 T^2 \sin 2\phi + \left(ADTN_c + \frac{N_c}{2} - \frac{N_s}{2} \right) \sin 2\phi + (ADTN_c + N_c N_s) \cos 2\phi \quad (13)$$

得到信号的相差项为 $\frac{1}{2} A^2 T^2 \sin 2\phi$,

$\left(ADTN_c + \frac{N_c}{2} - \frac{N_s}{2} \right) \sin 2\phi$ 和 $(ADTN_c + N_c N_s) \cos 2\phi$ 为噪声项。相差信号幅值远大于噪声, 再将相差信号送入环路的低通滤波器, 反馈到本地载波发生器进行相位调整, 当相差 ϕ 接近为 0 的时候, 通过 I 路将信号输出, 完成信号的载波跟踪, Q 路则只有噪声分量集中。

3) GNSS 信号码相位跟踪环

信号完成载波跟踪后, 需要进入码跟踪环路进行接收信号的 C/A 码相位跟踪, 并输出与接收的卫星信号 C/A 码相位吻合的本地码。本文码相位跟踪的实现环是延迟锁定环 (delay lock loop, DLL)。延迟锁定码跟踪环结构如图 4 所示。

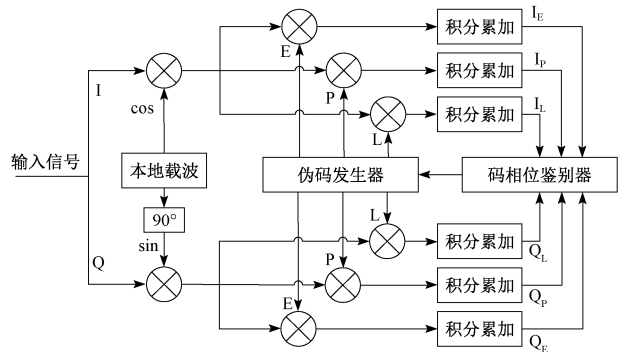


图 4 DLL 环跟踪结构

Fig. 4 Tracking structure of DLL

接收信号为 $x(t)$, 如式(14)所示。

$$x(t) = AC(t - \tau)D(t) \cos(\omega_i t + \theta_0) + n_i(t) \quad (14)$$

式中: A 为信号的幅值; $C(t - \tau)$ 为伪码, τ 是码相位; $D(t)$ 为电文数据; ω_i 是载波频率; θ_0 为载波相位; $n_i(t)$ 为噪声分量。输入信号与本地载波分别同相和正交相乘

后,得到解调信号 $x'(t)$ 为:

$$x'(t) = A'C(t - \tau)D(t) \cos\phi + v_i(t) \quad (15)$$

其中 $\phi = \theta - \theta_0$ 为载波跟踪的相差,经载波跟踪成功后其值在一个很小的范围内。

伪码发生器产生的 E 码、P 码、L 码分别为:

$$x_E(t) = C\left(t - \tau + \frac{d}{2}\right) \quad (16)$$

$$x_P(t) = C(t - \tau) \quad (17)$$

$$x_L(t) = C\left(t - \tau - \frac{d}{2}\right) \quad (18)$$

式中: d 的单位为伪码周期 T_C , 利用超前 E 码和滞后 L 码的值来判断中间 P 码是否与输入信号的相位对齐,然后对本地相位进行调整使得 $\Delta\tau = (\tau - \hat{\tau}) \rightarrow 0$ 。

信号与 E 码、P 码、L 码相乘后的结果进入到积分器中进行积分累加及滤波,积分结果为:

$$y_E(\Delta\tau) = \int_0^T x_E(t)x'(t) dt \quad (19)$$

$$y_P(\Delta\tau) = \int_0^T x_P(t)x'(t) dt \quad (20)$$

$$y_L(\Delta\tau) = \int_0^T x_L(t)x'(t) dt \quad (21)$$

其中 T 为积分的时间,取伪码周期的整数倍,将结果输入到码相位鉴别器利用 y_L 和 y_E 计算出码相位的误差值,然后进行低通滤波后反馈到伪码发生器进行相位的调整。

3 仿真与分析

3.1 多频 GNSS 射频前端系统仿真与分析

多频 GNSS 射频前端系统设计采用专业的微波/射频电路仿真软件 ADS2019 (advanced design system) 进行仿真,该软件在射频领域使用非常广泛,能够实现复杂系统的精确仿真计算^[13]。

对射频前端系统的通道预算分析包括通道增益、噪声系数和接收灵敏度^[14]。分别搭建 3 个通道链路进行“BUDGET”仿真。由于“BUDGET”的仿真范围没有涵盖功分器等多端口器件,因此搭建原理图时尽可能用了其他同类器件替代。首先对 L1 信号通道链路仿真,VGA 用了固定增益放大器替代,并且设置了最大增益 45 dB。系统的输入信号频率为 1 575.42 MHz,信号功率设置为 -130 dBm。通道链路仿真结果如表 1 所示,链路固定增益为 82.62 dB,考虑到功分器等损耗,链路固定增益可达 75 dB。根据各级的增益以及噪声系数可计算链路总的噪声系数约为 0.556 0 dB,系统接收灵敏度约为 -145 dBm。从仿真结果也可看出,当输入信号功率为 -130 dBm,VGA 最大增益时可输出信号功率为 -2.38 dBm,大于系统要求模拟中频信号典型功率 -7 dBm,即 L1 链路的接收灵敏度高于 -130 dBm。因此 L1 链路设计满足指标要求。同样方法对 G1、B2 通道进行仿真,均满足设计指标要求。

表 1 L1 通道链路仿真结果

Table 1 L1 channel simulation results

	LNA	SF1186	L1_RFA	L1_MIX	L1_IFA	L1_IF_Filter	L1_VGA
各级噪声系数/dB	0.500	2.680	2.300	8.600	1.500	1.700	6.500
输入信号噪声/dB	0.500	0.502	0.505	0.505	0.505	0.505	0.505
各级输出信号增益/dB	32.000	29.320	60.320	63.320	84.320	82.620	127.620
各级输出信号功率/dBm	-98.000	-100.680	-69.680	-66.680	-45.680	-47.380	-2.380

3.2 GNSS 基带信号处理仿真分析

1) GNSS 信号的捕获仿真分析

基于各系统的 GNSS 信号捕获相似原理,以 GPS L1 频点作为捕获性能的分析,L1 的特点是 C/A 码的码速率为 1.023 Mcps,总共 1 023 个码片,且 C/A 码的周期为 1 ms^[15]。由上述的相关性分析,将搜索范围设置为 1 023 个码相位,搜索步长为 1 个采样点,即 1/16 的 C/A 码元,频率的步进值使用 10 Hz。

由于载噪比对于捕获的精度有较大的影响,而在外在环境中 GNSS 信号的载噪比的范围为 35~55 dBHz,且载噪比越高其捕获精度越高,因此设置较低的载噪比 35 dBHz 来获取允许的最低捕获精度。以上的参数分析设计完成后在 MATLAB 软件环境下进行捕获的仿真测

试。从表 2 可以看出捕获的频移误差结果为 14 Hz,约为多普勒频移的 0.932%,即采基于 FFT 的并行码相位搜索捕获可以达到良好的捕获精度,其以 1 个采样点为步长对 6 758 个采样点搜索捕获的执行时间仅为 0.68 s,捕获速度满足航测无人机的作业速度要求。

表 2 捕获结果

Table 2 Acquisition result

多普勒频移	频移误差	捕获时间
1 502 Hz	14 Hz	0.68 s

2) 载波及码相位跟踪的仿真分析

基于 GNSS 信号跟踪分析以及信号捕获实验(图 5~

8), 仿真在 MATLAB 软件平台进行, 同样由 GNSS 信号跟踪的相似性, 本次实验仍然选取 GPS L1 频段进行跟踪分析, 使用前面捕获的中频信号为 10.425 1 MHz, 采样率为 12.112 3 MHz, 采用 1 ms 的周期为跟踪周期。

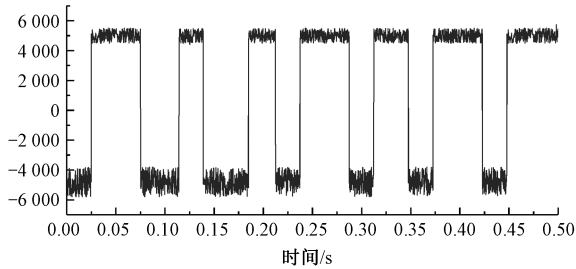


图 5 跟踪输出导航数据码

Fig. 5 Navigation data code of tracking output

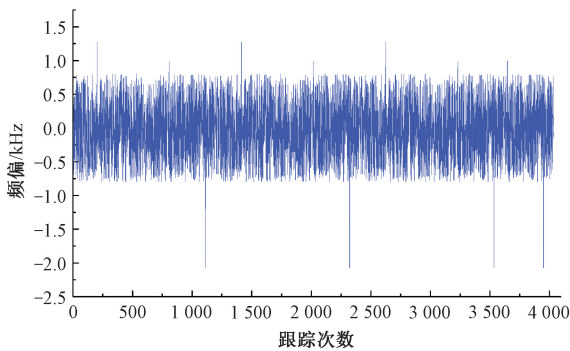


图 6 频率跟踪误差

Fig. 6 Frequency tracking error

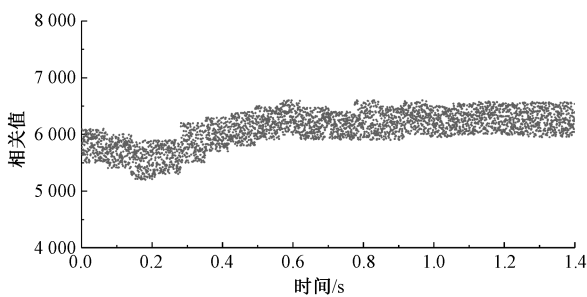


图 7 I 路跟踪相关结果

Fig. 7 Tracking result of in-phase channel

从图 5 可以看出成功跟踪并输出导航数据码; 图 6 为跟踪稳定后输出的跟踪频率误差, 误差基本集中在 0.75 kHz 以下, 即载波跟踪良好。由图 7 和 8 可见, 跟踪环路 I 路输出结果在 0.6 s 以后跟踪达到稳定状态, 且 I 路跟踪的相关值比 Q 路跟踪的相关值较高, I 路在跟踪稳定后相关值保持在 6 000, Q 路基本是跟踪环路的累积噪声, I 路有良好的码相位跟踪。

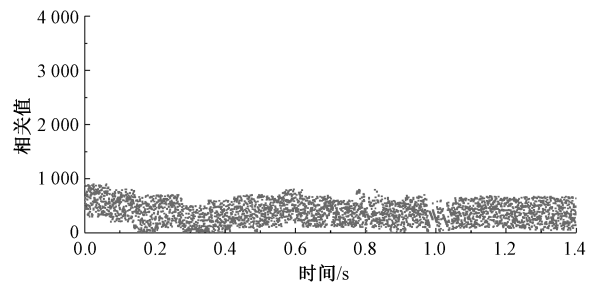


图 8 Q 路跟踪相关结果

Fig. 8 Tracking result of quadrature channel

4 结 论

本文主要研究了 RTK 定位接收机 GNSS 信号处理技术, 包括前端射频信号处理与基带信号处理, 设计了兼容 GPS、GNOLASS、Galileo 以及北斗三号四大全球导航卫星系统的多频段射频前端处理模块、基带数字信号处理模块, 并通过专业仿真软件分析, 结论如下。

1) 采用低功耗、易集成的正交下变频的低中频结构设计可成功处理 GPS 的 L1/L5、Galileo 的 E1/E5a、GLONASS 的 G1 以及北斗三号的 B2a 频段, 并验证其性能的可靠性。

2) 在 MATLAB 软件环境下进行基带信号捕获的仿真测试, 结果显示采用基于 FFT 并行码相位搜索法进行 GNSS 基带信号捕获, 满足航测无人机作业速度要求。

3) 采用 Costas 环载波跟踪和 DLL 环码相位跟踪方式, 能完成载波跟踪并输出导航数据码, 并且载波和码相位跟踪稳定性都符合航测无人机 RTK 定位接收机作业要求。

参考文献

- [1] 郑光明. RTK 定位技术在测绘中的应用[J]. 科技创新与应用, 2012, 3(5):19-20.
ZHENG G M. Application of RTK positioning technology in surveying and mapping[J]. Technological Innovation and Application, 2012, 3(5):19-20.
- [2] 洪冰清, 覃新贤, 陈海强. 多系统兼容卫星导航接收机关键技术概述[J]. 电子科技, 2017, 30(6):150-156.
HONG B Q, QIN X X, CHEN H Q. Reviews on key techniques in multiple systems combined GNSS receivers[J]. Electronic Sci & Tech, 2017, 30(6):150-156.
- [3] 曹相, 王庆, 高成发. 基于 BDS-3、GPS 和 Galileo 重叠频率观测值的紧组合 RTK 定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10):141-147.
CAO X, WANG Q, GAO CH F et al. Tightly combined RTK positioning method based on the overlapping-frequency observations of BDS-3, GPS and Galileo[J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 141-147.
- [4] LI X, GE M, DAI X, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, Beidou, and Galileo [J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(6):607-635.
- [5] 王忠, 刘光斌, 张博. 基于 DSP+FPGA 的多频 GPS 接收机系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(8):1919-1920.
WANG ZH, LIU G B, ZHANG B. Design of multi-frequency GPS receiver system based on DSP and FPGA [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(8):1919-1920.
- [6] 王亚平, 龚华军, 甄子洋. 基于 ARM 的 GPS/BD2 组合接收机设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2012, 35(12):67-70.
WANG Y P, GONG H J, ZHEN Z Y. Design and implementation of GPS/BD2 receiver based on ARM [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(12):67-70.
- [7] 刘国燕, 喻国荣. 多星座 CORS 基站接收机设计及数据质量实时评价 [J]. 测绘工程, 2020, 29(1):41-46.
LIU G Y, YU G R. Design of multi constellation CORS base station receiver and real-time evaluation of data quality [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2020, 29(01):41-46.
- [8] 李彦迪, 陈硕烁, 李文瑞. GPS/Galileo 双频双模接收机射频前端的系统设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2013, 36(17):81-84.
LI Y D, CHEN SH SH, LI W R. System design and implementation of GPS/Galileo dual-band and dual-mode RF front-end [J]. Modern Electronic Technology, 2013, 36(17):81-84.
- [9] 李祺, 秦红磊. 卫星导航接收机通用射频前端设计及实现 [J]. 电子测量技术, 2017, 40(2):73-76.
LI ZH, QIN H L. Design and implementation of general navigation receiver RF front-end [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(2):73-76.
- [10] 刘瑞华, 孔月明, 蔚保国, 等. GPS 软件接收机基带信号处理算法及验证 [J]. 航天控制, 2016, 34(001):3-8.
LIU R H, KONG Y M, WEI B G. Algorithm and verification of baseband signal processing for GPS software receiver [J]. Aerospace Control, 2016, 34(1):3-8.
- [11] GAO X, XI L, YAO R, et al. A high precision acquisition algorithm of GPS based on parallel frequency search [C]. 25th Wireless & Optical Communication Conference (WOCC), 2016:1-4.
- [12] DENG H G, WANG J, JI Y F, et al. Research on fast FFT acquisition algorithm and its realization on FPGA [J]. Video Engineering, 2012, 36(11):67-69.
- [13] 何苏勤, 白天石. 射频电路的 ADS 设计仿真与分析 [J]. 微电子学, 2011, 41(4):479-483.
HE S Q, BAI T SH. Simulation and analysis of RF circuit design using ADS [J]. Microelectronics, 2011, 41(4):479-483.
- [14] 贾锋, 杨瑞民. 射频接收前端的 ADS 设计与仿真 [J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(13):219-223.
JIA F, YANG R M. ADS design and simulation of radio receiver front-end [J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(13):219-223.
- [15] 赵丽, 陈小惠, 潘树国. GPS 频域并行码捕获改进算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(11):985-990.
ZHAO L, CHEN X H, PAN S G. Improved frequency domain parallel code acquisition algorithm for GPS signal [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(11):985-990.

作者简介



邓耀华, 2012 年于华南理工大学获得博士学位, 现为广东工业大学教授, 主要研究方向为数字信号处理与控制技术。

E-mail: dengyaohua@gdut.edu.cn

Deng Yaohua received his Ph. D. degree from South China University of Technology in 2012. Now he is a professor at Guangdong University of Technology. His main research interests include digital signal processing and control technology.



姚可星 (通信作者), 2017 年于西南石油大学获得学士学位, 2020 年于广东工业大学获得硕士学位, 主要研究方向为载波相位差分定位技术。

E-mail: kexingyao@foxmail.com

Yao Kexing (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2017, M. Sc. degree from Guangdong University of Technology in 2020. His main research interest is carrier phase differential positioning technology.