

基于变频转发 RDSS 信号模拟的参数生成算法*

占建伟, 张 镨, 张国柱, 欧 钢

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:近年来,有源与无源体制兼容型的 RDSS 接收机技术的迅速发展对与之匹配的高精度卫星信号模拟器的研制提出了迫切需求。模拟器主要包含卫星轨道仿真、用户轨迹仿真、误差建模、信号生成参数计算等模块。其中信号生成参数的模拟是需要解决的一项关键技术。但由于 RDSS 卫星导航系统的信号播发具有变频转发的特点,使得信号参数的模拟变得比 GPS 等直播式系统复杂。为此,提出了一种适合变频转发的卫星信号生成参数算法,并推导了多普勒频移参数计算公式。仿真实验结果验证了文中算法的正确性。

关键词:卫星导航; RDSS; 仿真系统; 伪距; 多普勒频移; 迭代算法

中图分类号: TN228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)02-0088-06

Signal parameter production algorithm based on frequency conversion and transmitting

ZHAN Jianwei, ZHANG kai, ZHANG Guozhu, OU Gang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: As the technology of the dual-mode RDSS receiver with passive and active positioning function has been developing rapidly nowadays, the high precision simulator is strongly demanded. The simulator comprises the satellite orbit module, the target trajectory calculation module, the error calculation module, and the like. The production of signal parameters has been a crucial technique that must be solved for the RDSS signal simulator. However, compared with GPS system, RDSS satellite system is a transmitting system with transponder and frequency conversion, which gives rise to more complexity in RDSS signal parameter production. Therefore, for the transmitting satellite system, signal parameter production algorithm was proposed; the formulae for the Doppler frequency shift were derived for the first time. Simulated experiments were carried out, and the results verified the validity of the algorithm.

Key words: satellite navigation; RDSS; simulation system; pseudorange; Doppler frequency shift; iterative algorithm

我国正在建设并即将投入使用的“北斗二号”RDSS(Radio Determination Satellite Service)卫星导航系统相比“北斗一号”系统^[1-2],工作卫星数由3颗增加到5颗,系统功能和性能均有扩展和提升,能够支持传统模式有源定位以及新扩展模式下无源定位和 CRDSS 无线定位报告^[3-9]。但与 RDSS 接收机技术本身的发展速度相比,对于接收机性能评估和相关测试设备的进展要滞后很多。

目前常用的测试方法主要有:真实系统环境下的测试和模拟器仿真测试。后一种测试方法相比前一种测试方法具有场景可控和可重复的优点,保证了测试结果的正确性和一致性,因此是一种更有效的方法。作为接收机性能评估的测试设备,模拟器能精确模拟接收机在各种复杂环境下接收到的卫星信号。但是作为世界上目前仅有的

转发式 RDSS 卫星导航系统,国内相关模拟器的研制起步晚,进展缓慢。文献[10-11]给出的“北斗一号”双星动态信号生成参数(多普勒频移、传播时延)的计算方法中,多普勒频移的模拟不完整,未考虑 C 频段上行链路的多普勒频移;文献[12]建立的星钟模型与实际系统不符, RDSS 卫星导航系统的信号在地面中心站生成,卫星透明变频转发信号;文献[13-15]分别介绍了转发式体制的站间和 CAPS 系统信号模拟方法,对 RDSS 信号模拟器的设计具有参考意义。本文提出了一种适合变频转发的卫星信号生成参数算法。

1 RDSS 卫星导航仿真系统的原理

结合文献[13-15]阐述的无源定位和 CRDSS 定位报告原理可知,新组合工作模式下信

* 收稿日期:2011-11-20

基金项目:中国卫星导航学术年会青年优秀论文资助项目(CSNC2011-QY-06)

作者简介:占建伟(1983—),男,江西抚州人,博士研究生,E-mail:sophy_zjw@163.com;

欧钢(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:ougangcs@gmail.com

号模拟器需要依据复杂的卫星轨道、用户轨迹和伪距误差项(电离层、对流层、地球自转效应,观测噪声等)模型仿真计算到达接收机天线口面的 S 频段 RDSS 出站信号。

考虑 RDSS 卫星导航系统的特点和硬件设计复杂度,仿真平台采用主控计算机和信号生成单元组合的架构。其中主控计算机根据卫星轨道模型,用户轨迹模型、误差模型和伪距生成算法完成周期 ΔT 的信号模型生成参数计算后,按照协议发送至信号生成单元。信号生成单元根据信号生成模型快速插值计算并产生信号模型参数,最后生成伪码扩频物理信号,仿真结构如图 1 所示。

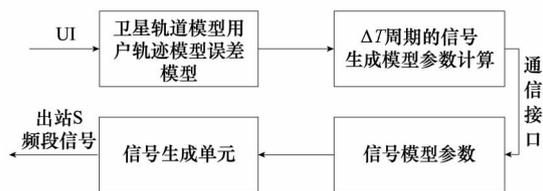


图1 仿真架构

Fig. 1 Simulation architecture

图 1 中 ΔT 为信号模拟器信号生成参数的更新频率。信号生成模型可采用一定阶数的运动模型来拟合卫星和中心站或卫星和接收机之间的相对运动。由于 RDSS 卫星导航系统 GEO 卫星的静态特性,动态非常小,它与接收机之间的相对运动比较平滑。在 $\Delta T=0.01$ s 时,可满足伪距精度 $10e-3$ m 和相对速度精度 $10e-3$ m/s 的要求,且存在 ΔT 减小一个数量级,伪距的估计误差和相对速度的估计误差至少减少 4 个数量级^[16]的对应关系。因此,针对 RDSS 卫星导航系统,理论上选取足够小的 ΔT ,采用如式(1)所示包含伪距、相对速度、相对加速度和相对加加速度的三阶运动模型来描述中心站-卫星-接收机之间的相对运动是满足误差要求的,可实现高精度的信号模拟。

$$\begin{cases} v_{k+1} = v_k + a_k \Delta T + \frac{1}{2} j_k \Delta T^2 \\ s_{k+1} = s_k + v_k \Delta T + \frac{1}{2} a_k \Delta T^2 + \frac{1}{6} j_k \Delta T^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: s_k 、 v_k 、 a_k 和 j_k 分别是时刻 t_k 中心站-卫星-接收机之间的伪距、相对速度,相对加速度和相对加加速度,其中 $t_{k+1} = t_k + \Delta T$ 。

解方程(1),即可求得相对加速度和相对加加速度:

$$\begin{cases} a_k = \alpha \times (s_{k+1} - s_k) - \beta \times v_{k+1} - 2\beta \times v_k \\ j_k = \gamma \times (s_{k+1} - s_k) + \alpha \times (v_{k+1} + v_k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 、 β 、 γ 是只与 ΔT 有关的量。事实上,多普

勒频移可以视为相对速度矢量在卫星视线上的投影^[17],因此相对速度 v_k 可以用多普勒频移来等效计算。

结合式(1)和式(2)可以明显看出,相对速度 v_k 、 v_{k+1} ,和伪距 s_k 、 s_{k+1} 两类参数是整个仿真信号生成的核心。

2 信号生成参数多普勒频移模拟算法

为了描述方便,如未特别说明,下文涉及的时间变量都是北斗时(BDT),且分别用 C 和 G 标记区分载波和伪码相关的变量,并定义径向为:上行链路的径向为指向中心站的单位矢量,下行链路的径向为指向卫星的单位矢量。

2.1 转发式多普勒效应

RDSS 卫星导航系统中的 GEO 卫星,由于受到各种摄动力的影响,存在东西和南北方向周期性摆动,因此中心站和卫星、接收机和卫星之间存在相对运动;另一方面,卫星时钟本振频率含有误差或漂移,上述两种因素造成卫星和接收机观测的 C 频段和 S 频段信号都存在如式(3)的多普勒频移^[18]。

$$f_d = f_r - f = f_r v/c \quad (3)$$

式中: f_d 为多普勒频移; f 为上行或下行链路载波标称频率; f_r 为观测频率; v 为卫星相对于中心站或接收机相对于卫星的径向速度; c 为传播速度。

多普勒频移对卫星信号的影响主要体现在调制数据的扩频伪码和载波中。在 RDSS 卫星导航系统中,出站信号由地面中心站生成,通过 C 频段上行至 GEO 卫星,透明变频转发后,再经 S 频段下行广播给用户,整个过程如图 2 所示。

2.2 转发式多普勒频移仿真模型

在 GPS、GLONASS、Galileo 和 COMPASS 等全球四大直播式导航系统中,载波与伪码的多普勒频移满足式(4)所示的线性关系^[19]。但 RDSS 卫星导航系统是一个转发式的系统,信号由地面中心站生成并发射至卫星,经变频转发后再下行广播。在这个过程中,出站信号经卫星变频转发时,载波标称频率由上行链路的 C 波段 f_1 变为下行链路的 S 波段 f_2 ;而伪随机码的码速率保持不变,故其多普勒频移不因载波频率搬移发生变化,接收机观测提取的载波和伪码多普勒频移不再符合式(4)的关系。因此,针对转发式卫星导航系统,明确载波多普勒的变化规律,重新建立模型分析两者之间的关系是十分必要的。

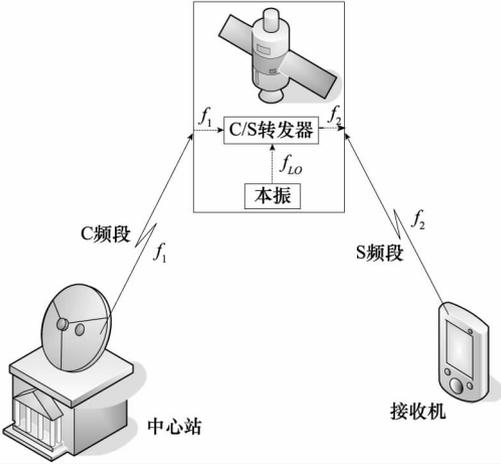


图 2 RDSS 系统变频转发原理示意图

Fig. 2 Principle of transmitting and frequency conversion in RDSS system

$$\frac{f_{dG}}{f_c} = \frac{v(t)f_G}{c} = \frac{f_G}{f_c} \quad (4)$$

式中： f_{dG} 和 f_{dC} 分别为伪码和载波的多普勒频移； f_G 和 f_c 分别表示码速率和载波频率。

首先分析载波多普勒。为简化推导过程，不考虑星上本振频率漂移的影响，接收机在接收时刻 t_r 接收到的信号频率为：

$$\begin{aligned} f_r &= f_2' + f_{d_{down}} \\ &= (f_1 + f_{d_{up}} + f_{LO}) + f_{d_{down}} \\ &= (f_1 + f_{d_{up}} + (f_2 - f_1)) + f_{d_{down}} \\ &= (f_{d_{up}} + f_2) + f_{d_{down}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： f_1 、 f_2 和 f_2' 分别为上行链路载波标称频率、下行链路载波标称频率和下行链路载波播发的实际频率； $f_{LO} = f_2 - f_1$ 为卫星本振标称频率； $f_{d_{up}}$ 和 $f_{d_{down}}$ 分别为上行链路中卫星转发载波时刻 $t_{s,C}$ 和下行链路中观测时刻 t_r 的瞬时载波多普勒频移。结合(5)式可以看出，接收机在时刻 t_r 直接提取的下行信号载波多普勒频移 f_{dC} 为：

$$\begin{aligned} f_{dC} &= f_r - f_2 \\ &= f_{d_{up}} + f_{d_{down}} \\ &= \left(\frac{c + v_{su}}{c - 0} f_1 - f_1 \right) + \left(\frac{c + v_r}{c - v_{sd}} f_2' - f_2 \right) \\ &= \frac{v_{su}}{c} f_1 + \frac{v_{sd} + v_r}{c - v_{sd}} f_2' \end{aligned} \quad (6)$$

式中： v_{su} 和 v_{sd} 分别表示上行链路和下行链路中卫星速度分别在时刻 $t_{s,C}$ 和 t_r 上的瞬时径向分量； v_r 表示接收机速度在时刻 t_r 上的瞬时径向分量。考虑到 $v_{sd} \ll c$ ，因此式(6)可以简写为：

$$f_{dC} \approx \frac{v_{su}}{c} f_1 + \frac{v_{sd} + v_r}{c} f_2' \quad (7)$$

定义 v_{up} 和 v_{down} 分别表示卫星相对中心站和接收机相对卫星在时刻 $t_{s,C}$ 和 t_r 的载波伪距变化率的瞬时分量。不难看出， $v_{up} = v_{su}$ ， $v_{down} = v_{sd} + v_r$ ，因此式(7)可以重写为：

$$\begin{aligned} f_{dC} &\approx \frac{v_{up}}{c} f_1 + \frac{v_{down}}{c} f_2' \\ &= \frac{v_{up}}{c} f_1 + \frac{v_{down}}{c} \left(\frac{v_{up}}{c} f_1 + f_2 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其次分析伪码多普勒。由前文分析可知，伪码速率在转发前后码速率保持不变，因此伪码多普勒频移为 $f_2 = f_1$ 的特例，即

$$f_{dC} \approx \frac{v_{up}'}{c} f_G + \frac{v_{down}'}{c} \left(\frac{v_{up}'}{c} f_G + f_G \right) \quad (9)$$

式中： v_{up}' 和 v_{down}' 分别表示卫星相对中心站和接收机相对卫星在伪码转发时刻 $t_{s,C}$ 和 t_r 的伪码伪距变化率；综合式(8)和式(9)，RDSS 卫星导航系统中，伪码 f_{dC} 和载波多普勒频移 f_{dC} 为非线性关系，式(4)不再满足。

图 3 给出了 RDSS 卫星导航系统 G1 星上行链路多普勒频移随卫星运动的变化情况。其中，上行发射标称频率选取 RDSS C 频段 5725 MHz ~ 7075 MHz^[20] 的中心频率 $f_1 = 6400$ MHz。

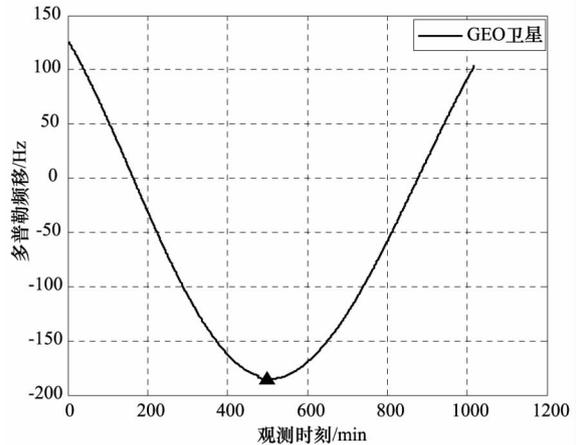


图 3 上行链路多普勒频移曲线

Fig. 3 Uplink Doppler frequency shift curve

可见，对于地面上处于静止状态的中心站，GEO 卫星上行链路信号多普勒频移范围约在 ± 200 Hz 范围，变化规律与卫星动态类似，卫星动态范围增大，上行链路多普勒频移也将增大。因此，在信号生成参数的仿真计算过程中，上行链路多普勒频移是不可忽略的部分。

3 信号生成参数伪距模拟算法

与 GPS 模拟器只需完成下行链路信号的模

拟不同, RDSS 卫星导航系统的转发特点使得仿真时必须同时考虑上行链路和下行链路的伪距。因此模拟器仿真接收机天线口面接收的卫星信号时,必须从天线口面接收时刻逆向计算卫星转发信号的時刻和中心站发射信号的時刻。

假设在时刻 t_r 到达接收机天线口面的 RDSS 出站信号是 GEO 卫星在时刻 t_s 转发,中心站在时刻 t_l 发射的,三者有如下关系:

$$t_s = t_r - \tau_{down} \quad (10)$$

$$t_l = t_s - \tau_{up} - \tau_{c/s} \quad (11)$$

式中: τ_{up} 和 τ_{down} 分别为上下行链路的传播总时延,包含电离层时延 τ_{ion} 、对流层时延 τ_{trop} 、相对论效应时延 τ_{sagnac} 、通道时延 τ_{cha} 和噪声引起的时延 τ_n ,其中 $\tau_{c/s}$ 为转发器时延。由于模拟对象为天线口面接收的信号,且时间频率基准在地面中心站,因此式(10)和(11)都不必考虑接收机钟差和卫星钟差。

3.1 循环迭代模型

以下行链路伪码伪距计算为例,建立循环迭代模型。

$$\tau_{down_G} = r/c + \tau_{ion} + \tau_{trop} + \tau_{cha} + \tau_{sagnac} + \tau_n \quad (12)$$

其中:

$$r = r(t_r, t_{s_G}) = r(t_r, t_r - \tau_{down_G}) \quad (13)$$

式中: r 为 t_{s_G} 时刻的卫星至 t_r 时刻的接收机天线口面的空间几何距离, c 为真空中光速。因为 r 的计算式(13)含有待求的 τ_{down_G} ,而 τ_{down_G} 的计算式(12)反过来又含有待求的 r ,所以借助迭代法逐次逼近,求解 r 和 τ_{down_G} 。其中迭代初值可设置为 $t_{s_G} = t_r - 0.125$,即初始化为接收时刻减去 GEO 与地面的平均传播时延 125 ms。

为避免计算设备字长限制带来的计算误差影响,一般选择对转发时刻敏感且收敛快的空间几何距离和迭代次数作为迭代终止条件:

$$|r(k+1) - r(k)| < \varepsilon \quad (14)$$

$$k \geq N_0 \quad (15)$$

式中: k 为迭代次数。 ε 为收敛门限,由所需要的精度决定,一般取 $\varepsilon < 1e-10$ 能满足要求。实际仿真表明,该结束条件的选择是合理的,整个循环计算过程只需要 3~4 次,且时间相当短。此时收敛点 $r(k)$ 和 $\tau_{down_G}(k)$ 即为时刻 t_r 对应的下行链路空间几何距离和伪码伪距时延。

与上行链路伪距相比,下行链路伪距的计算过程类似,但有点发生了变化,需要特别考虑:

(1) 逆推方向发生改变。由于信号由中心站

发送至卫星,因此需根据卫星转发信号时刻 t_{s_C} 逆推信号在中心站发送时刻 t_{l_C} 。

(2) τ_{sagnac} 效应修正。在地心地固坐标系中仿真伪距数据,需要依式(16)对信号发射源坐标进行修正。在下行链路中, GEO 卫星被等效为信号发射源,但在上行链路中, RDSS 出站信号是由中心站生成后发射至 GEO 卫星变频透明转发,因此式(16)中 $(X_s(k), Y_s(k), Z_s(k))$ 应代入中心站坐标。

$$\begin{bmatrix} X'_s(k) \\ Y'_s(k) \\ Z'_s(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\omega\tau_k & 0 \\ -\sin\omega\tau_k & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s(k) \\ Y_s(k) \\ Z_s(k) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $(X_s(k), Y_s(k), Z_s(k))$ 表示信号发射源第 k 次迭代的原始坐标; τ_k 为第 k 次迭代信号传输时延; $(X'_s(k), Y'_s(k), Z'_s(k))$ 为修正后的信号发射源第 k 次迭代的坐标。

载波伪距模型与伪码伪距的一样,但由于电离层的色散效应,它对码伪码测量值误差和载波相位测量值误差的影响大小相等,符号相反^[17],因此需将电离层效应引起的时延误差单独考虑。

$$\tau_{down_C} = r/c - \tau_{ion} + \tau_{trop} + \tau_{cha} + \tau_{sagnac} + \tau_n \quad (17)$$

3.2 模型分析

由于是循环迭代模型,收敛控制和计算复杂度是需要重点分析的性能。

假设上述逆推对应接收机 t_r 接收时刻的信号,发射时刻的迭代过程成功收敛,并分别标记中心站端伪码和载波发射时刻的收敛点为 t_{l_C} 和 t_{s_C} 。由于式(12)和式(17)是独立循环迭代计算的,从数学理论上分析两者的值将有差异。为了避免差异过大导致解算不收敛而发散,迭代结束后需依据式(18)检查两者的相对关系。

$$|t_{l_C} - t_{s_C}| < \mu \quad (18)$$

鉴于前述两者受电离层效应影响的区别, μ 一般取 4 倍的电离层误差时延均值,如若不满足,需要返回重新迭代计算。

此外,若考虑减小循环迭代算法计算复杂度的情况,上述计算过程可以作一些合理的简化:

(1) 不重复计算各误差项。由于各误差时延与卫星位置和信号时刻有关,每次迭代更新了卫星位置与发射/转发时刻值后,误差时延等误差量需要重新计算。但由于在信号实际传播过程中(平均值约为 125 ms) GEO 卫星几乎不动,中心站也处于静止状态,因此电离层和对流层等误差时

延可认为恒定不变,以减小迭代计算量。

(2) 伪码和载波伪距关联计算。在依据式(12)和式(17)迭代计算过程中,不考虑误差延迟项,只进行式(19)所示的几何距离 r 的迭代,收敛解算出 r 后,分别代入式(12)和式(17)得到伪码和载波伪距。实际仿真计算证明,这对生成的信号精度和接收机定位精度几乎没有影响,但相比计算量,将明显减小,实际工程中是可以考虑的方法。

$$\tau_{down} = r/c \tag{19}$$

4 实验结果分析

为评估信号生成参数模拟算法的性能,可从两个方面着手检验。第一,从算法设计上通过严格的理论分析来评估算法性能;第二,通过软件接收机解算定位信息,与设定信息进行比对,来评价算法性能。而在模拟器信号生成单元性能指标满足伪距精度 $\pm 0.1\text{ns}$,多普勒精度 $\pm 0.1\text{Hz}$,通道时延稳定性 $0.5\text{ns RMS}^{[15]}$ 的条件下,信号生成设备额外引入的误差对参数生成算法性能的影响可忽略不计,因此,可等效采用测试合格的用户机替代软件接收机进行参数生成算法性能评估。

RDSS 信号模拟器相关仿真模型分别为:卫星轨道仿真采用基于观测广播信息提取离散卫星位置速度的观测模型,其他误差相关模型采用系统规定的模型^[20]。

4.1 性能分析

假设软件接收机采用的模型与仿真模拟性一致,在运动模型确定的情况下,理论上参数性能 σ 由信号生成参数的更新频率 ΔT 引起的误差 E_T 和星历误差 E_s 共同决定:

$$\sigma = \sqrt{E_T^2 + E_s^2} \tag{20}$$

由于上文提到 E_T 在 $\Delta T = 0.01\text{s}$ 时,伪距精度和相对速度精度分别达到 $10\text{e}-3\text{m}$ 和 $10\text{e}-3\text{m/s}$;而 E_s 可通过优化插值或拟合方法使得误差优于 $10\text{e}-2\text{m}$ 量级^[21],因此按照式(20), σ 的影响很小,可以保证算法精度。

4.2 参数生成算法仿真

静态定位测试中,用户接收机的运动轨迹设为静止状态,理论位置为东经 112° ,北纬 28° ,高程 70m 。仿真生成上下行链路伪距时,在精确伪距上叠加一项高斯分布(μ, σ)的随机误差。

接收机按照“三星+接收机测高”的无源定位原理进行定位测试,解算时卫星轨道由出站广播电文计算得到,其他误差与仿真模型一致,高程

取值固定,因此在仿真计算过程中高程没有误差。

为了测试模型在不同强度噪声下的定位精度,分别加入(1) $\mu = 5, \sigma = 0.05$; (2) $\mu = 5, \sigma = 0.5$; (3) $\mu = 5, \sigma = 5$; (4) $\mu = 5, \sigma = 20$ 四组高斯分布的伪距测量噪声进行算法性能测试,每组重复测试 5000 次。测试得到在用户本地坐标下的北方向、东方向误差如图 4、图 5 和表 1 所示。

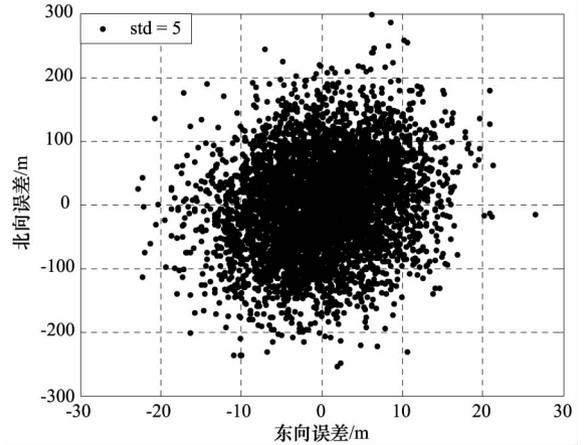


图 4 $\sigma = 5$ 时水平误差分散点图
Fig. 4 Horizontal positioning error at $\sigma = 5$

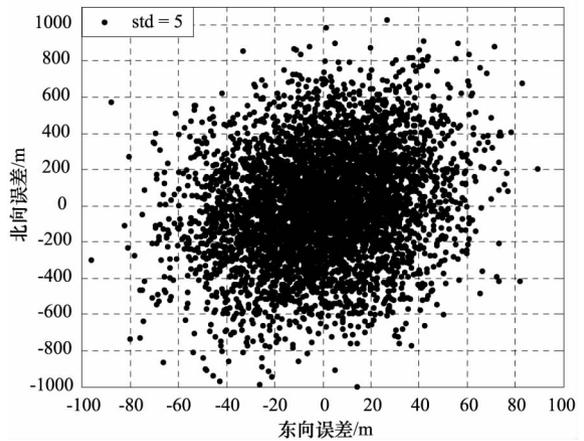


图 5 $\sigma = 50$ 时水平误差分散点图
Fig. 5 Horizontal positioning error at $\sigma = 50$

表 1 本地位置误差

Tab. 1 Local positioning error

伪距 标准差(m)	定位解算误差标准差(m)	
	北方向	东方向
0.05	0.755	0.071
0.5	7.556	0.646
5	77.402	6.536
20	304.151	26.170

分析以上数据可以看出:

(1)文献[9]和[22]指出由于 RDSS 卫星导航系统采用 GEO 卫星,几何因子较大,致使纬度

方向(北方向)对伪距误差更敏感,实验结果很好地符合这一特点;

(2)在不叠加伪距误差的情况下,接收机依据模型可基本消除路径上电离层、对流层等引起的误差;接收机单点定位误差的量级大体上与卫星轨道修正残差的量级相当。证明了模拟器生成伪距的高精度;

(3)叠加伪距误差 σ^2 越大,定位精度越差。

5 结论

结合新工作模式下 RDSS 接收机的测试需求,提出了一种适合变频转发的卫星信号生成参数算法,并详细推导了伪距和相对速度的模拟算法,分析了与直播式多普勒频移模拟算法的差异,给出了减小模型参数复杂度计算的方法。实验结果显示实现的 RDSS 信号模拟器伪距生成精度达 ns 级,证明了各模型算法的合理性和高精度。

参考文献 (References)

- [1] Rothblatt M A. Radio determination satellite services and standards [M]. Norwood, MA: Artech House, 1987.
- [2] Briskman R D. Radio determination satellite service [J]. Proceeding of the IEEE, 1990, 78(7):1096-1106.
- [3] 徐丽娟. BD-2 RDSS 分系统导航误差修正技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2007.
XU Lijuan. Research on error correcting technology for RDSS subsystem of Compass navigation satellite [D]. Beijing: the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [4] Dou C J, Zhang B Q. A new three-satellite high-precision RDSS/RNSS combination position method[C]//Proceeding of IEEE 2nd Education Technology and Computer Science Workshop, 2010: 288-289.
- [5] Tang Y G, Lian J X, Wu M P, et al. Reduced Kalman filter for RDSS/INS integration based on time differenced carrier phase[C]// Proceeding of IEEE 2nd Industrial Electronics and Applications, 2007: 11-14.
- [6] 汤勇刚, 练军想, 吴文启, 等. 北斗载波相位时间差分/SINS 紧组合技术与实验研究[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(2):19-20.
TANG Yonggang, LIAN Junxiang, WU Wenqi, et al. Tightly coupled integration technology of RDSS time difference carrier phase/SINS and its experimental research [J]. Journal of National University of Defense Technology. 2007, 29(2):19-20. (in Chinese)
- [7] 谭述森. 广义卫星无线电定位报告原理及应用价值[J]. 测绘学报, 2009, 38(1): 1-5.
TAN Shusen. Theory and application of comprehensive RDSS position and report [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(1): 1-5. (in Chinese)
- [8] 谭述森. 广义 RDSS 全球定位报告系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
TAN Shusen. The comprehensive RDSS global position and report system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [9] 孙国良, 丁子明. 双星系统工作方式改进的探讨[J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1210-1218.
SUN Guoliang, DING Zhiming. Working method improvements of Beidou satellite system[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(9): 1210-1218. (in Chinese).
- [10] 张桂华, 孙彩英. “北斗一号”导航定位动态信号的模拟实现[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(11):2731-2734.
ZHANG Guihua, SUN Caiying. Simulation and implementation of BD-1 dynamic navigation signals [J]. Journal System Simulation, 2005, 17(11): 2731-2734. (in Chinese)
- [11] 张桂华, 陈锡春. 北斗用户设备测试系统的设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(1):16-21.
ZHANG Guihua, CHEN Xichun. Design and implementation of automatic test system for BD-1 user equipment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(1): 16-21. (in Chinese)
- [12] Ma H J, Hu Y H, Wu J F, et al. Design and analysis of high dynamic CAPS signal simulation testing system [C] // Proceeding of IEEE 22nd European Frequency and Time Forum, 2009: 288-289.
- [13] 范国清. 高精度实时卫星导航仿真系统关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2010.
Fan Guoqing. Study on key technology of high precision and real-time simulation of satellite navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] Ma H J, Hu Y H, Wu J F, et al. Design and analysis of high dynamic CAPS signal simulation testing system [C] // Proceeding of IEEE 22nd European Frequency and Time Forum, 2009: 288-289.
- [15] 占建伟, 庞晶, 张国柱, 等. RDSS 卫星授时误差建模与仿真测试[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2011, 41(5): 620-628.
ZHAN Jianwei, PANG Jing, ZHANG Guozhu, et al. Modeling and simulation testing of RDSS timing[J]. Scientia Sinica Phys, Mech & Astron, 2011, 41(5): 620-628. (in Chinese).
- [16] 张鑫. GPS 中频信号源模拟实现[D]. 长沙:国防科技大学,2008.
ZHANG Xin. Design and implementation of GPS intermediate frequency signal simulator [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [17] Kaplan E D. Understanding GPS: principles and applications[M]. Boston: Artech House, Inc., 2006: 310-311.
- [18] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
XIE Gang. Principles of GPS and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [19] 齐巍, 常青, 张其善. 高动态信号模拟器中的多普勒模拟算法[J]. 航空学报, 2008, 29(5):1252-1255.
QI Wei, CHANG Qing, ZHANG Qishan, et al. Arithmetic of Doppler simulation in high dynamic signal simulator[J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1252-1255. (in Chinese)
- [20] 谭述森. 卫星导航定位工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
TAN Shusen. The engineering of satellite navigation and positioning [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [21] 高玉东, 郗晓宁, 王威. GEO 导航星广播星历拟合改进算法设计[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(5):19-20.
GAO Yudong, XI Xiaoning, WANG Wei. An improved fitting algorithm design of broadcast ephemeris for GEO satellite[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(5):19-20. (in Chinese)
- [22] 夏爽. 基于北斗双星定位的被动算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
XIA Shuang. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)