

矢量跟踪环路抗多径性能研究

刘洋洋¹, 廉保旺¹, 赵媛²

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 多径干扰是影响 GNSS 定位精度的主要误差源之一, 从多径信号特征入手, 分析了多径干扰对载波环和码环的影响, 并研究了矢量跟踪环路(VTL)对多径的抑制性能。通过对比分析 VTL 和标量跟踪环路(STL)的环路结构, 建立了线性化的系统模型, 推导了码相位测量误差对 VTL 的影响。在 VTL 中, 未受多径影响的通道辅助受干扰的通道, 削弱多径带来的定位误差。通过仿真对比分析了一个和多个通道受多径干扰时, 多径对 VTL 和 STL 的影响, 结果表明, 受多径干扰的通道数越少, VTL 相对于 STL 抑制多径性能越好, 当所有通道都受多径干扰时, VTL 定位精度不差于 STL。

关键词: GNSS; 矢量跟踪环路; 多径干扰; 伪卫星

中图分类号: TN966 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0119-07

Study on anti-multipath performance of vector tracking loop

Liu Yangyang¹, Lian Baowang¹, Zhao Yuan²

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Multipath interference was one of the main error in GNSS. From the multipath signal characteristics, analysed the effect of multipath interference on carrier tracking loop and code tracking loop. And the anti-multipath performance with vector tracking loop (VTL) was studied. By analyzing the structure of VTL and scalar tracking loop(STL), a linear system model was established, and the effect of code tracking error on VTL was deduced. In VTL, the affected channels were assisted by other channels, weakening the multipath positioning errors. One and more affected channels by multipath had been established. Under these scenes, the simulations had been made to compare the positioning errors between STL and VTL. The experiments proved that, relative to the STL, the fewer affected channels, the better the anti-multipath performance with VTL. And when all channels are affected by multipath, the positioning accuracy of VTL is not worse than the STL.

Key words: GNSS; vector tracking loop; multipath interference; pseudolite

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61174194, 61301094)

作者简介: 刘洋洋(1990-), 男, 博士生, 主要从事卫星导航方面的研究。Email: liu_yang90@163.com

导师简介: 廉保旺(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事卫星导航方面研究。Email: bwlian@nwpu.edu.cn

0 引言

在全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)中,多径效应是影响 GNSS 定位精度的主要误差源之一。多径效应是指接收机在接收卫星直射信号之外,还可能接收到一个甚至多个周边物体反射的卫星信号,接收到的合成(直射加上反射)信号与接收机本地产生的参考信号之间的相关函数发生畸变,同时也会引起接收信号合成相位的畸变,在伪距和载波相位测量值上引入误差,从而造成位置、速度和时间解算的误差。

对于接收机来说,短延时的多径效应很难被抑制或消除。在多径抑制方面,最常用的方法是改进接收机环路的相关器或鉴别器,从而削弱多径的影响。早在 1992 年,窄相关技术^[1]即被提出,该方法通过减小相关器间距来减轻多径对跟踪环路的影响。任嘉伟^[2]通过采用多相关器的方法来改善鉴相器的抗多径性能,但是该方法会大大增加接收机的硬件复杂度。李春宇^[3]等将盲判决反馈均衡器引入到接收机跟踪环路中来抑制多径干扰。参考文献[4-5]详细分析论证了扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)在抗多径上的应用。刘婧^[6]等从接收机跟踪环路架构着手,对比了标量和矢量架构下的 GNSS 接收机在多径抑制方面的性能。参考文献[7-8]系统的阐述了矢量跟踪环路(Vector Tracking Loop, VTL)的架构模型,并对其多径抑制的机理进行了研究。

由多径引入的误差取决于其相对于直达信号的延迟、功率和载波相位。文中从多径信号的特征入手,从本质上分析了其对码相位和载波相位测量值的影响;在此基础上,分析了 VTL 自身的环路特性,建立了基于 EKF 的算法模型,并分析了多径对 VTL 跟踪性能的影响。最后通过仿真验证了理论分析的正确性。

1 多径模型

1.1 多径信号模型

多径信号模型是一组分离的反射信号,它们与直达信号相比,有较大的延迟、不同的信号幅度和载波相位。接收机实际接收到的信号是直达信号和反射信号的叠加,其接收到的中频信号可以表示为:

$$s(t) = \sum_{i=0}^M a_i A d(t-\tau_i) c(t-\tau_i) \cos(\omega t + \phi_i) + n(t) \quad (1)$$

式中: $i=0$ 表示卫星直达信号; i 为其它值时表示卫星反射信号; A 为直射信号幅度; a_i 为第 i 路信号的衰减系数; $d(t)$ 和 $c(t)$ 值是 ± 1 的数据码与伪码; τ_i 为第 i 路信号的码片延迟; ω 为考虑多普勒效应后的载波频率(假定反射信号和直达信号具有相同的载波频率和多普勒频偏); ϕ_i 为第 i 路信号的相位; $n(t)$ 为输入的高斯白噪声。

在下变频过程中,假设本地信号可以完全对中频信号进行载波剥离,则本地信号的同相支路和正交支路可以表示为:

$$\begin{aligned} s_I(t) &= c(t-\hat{\tau}_0) \cos(\omega t + \hat{\phi}_0) \\ s_Q(t) &= c(t-\hat{\tau}_0) \sin(\omega t + \hat{\phi}_0) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\hat{\tau}_0$ 和 $\hat{\phi}_0$ 分别为直达信号的延时估计和载波相位估计。为了便于讨论,认为载波幅度 A 是不变的,设 $A=1$,并且忽略导航电文数据和噪声的影响,中频信号 $s(t)$ 经过下变频并滤除 2 倍频分量后的超前、即时和滞后相关值分别可以表示为:

$$\begin{aligned} I_E &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M a_i R(\hat{\tau}_0 - \tau_i + d/2) \cos(\hat{\phi}_0 - \phi_i) \\ Q_E &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M a_i R(\hat{\tau}_0 - \tau_i + d/2) \sin(\hat{\phi}_0 - \phi_i) \\ I_P &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M a_i R(\hat{\tau}_0 - \tau_i) \cos(\hat{\phi}_0 - \phi_i) \\ Q_P &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M a_i R(\hat{\tau}_0 - \tau_i) \sin(\hat{\phi}_0 - \phi_i) \\ I_L &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M a_i R(\hat{\tau}_0 - \tau_i - d/2) \cos(\hat{\phi}_0 - \phi_i) \\ Q_L &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M a_i R(\hat{\tau}_0 - \tau_i - d/2) \sin(\hat{\phi}_0 - \phi_i) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: I_E, I_P, I_L 分别为同相超前、即时、滞后相关值, Q_E, Q_P, Q_L 分别为正交超前、即时、滞后相关值; d 为早晚码间距; $R(\tau)$ 为伪码的自相关函数,可以表示为:

$$R(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{T_c} |\tau| & |\tau| < T_c \\ 0 & |\tau| > T_c \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_c 为伪码码片宽度。

1.2 鉴相误差分析

假设多径信号和直达信号有相同的具有相同的

载波频率和多普勒频偏, 则多径信号对锁频环的影响可以忽略不计。锁频环采用四象限反正切函数鉴别器, 鉴频函数为:

$$\Delta f = \frac{\arctan 2(P_{\text{cross}}, P_{\text{dot}})}{2\pi[t(n) - t(n-1)]} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{dot}} &= I_P(n-1)I_P(n) + Q_P(n-1)Q_P(n) \\ P_{\text{cross}} &= I_P(n-1)Q_P(n) - Q_P(n-1)I_P(n) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $n-1$ 和 n 为两个相邻的历元。

在获得了超前、即时和滞后支路相关器输出后, 伪码采用非相干超前减滞后幅值法鉴相器, 锁相环采用二象限反正切函数鉴相器, 其鉴相器函数分别为:

$$\delta_{\text{cp}} = (1-d/2) \frac{E-L}{E+L} \quad (7)$$

$$\phi_{\text{ph}} = \arctan \left(\frac{Q_P}{I_P} \right) \quad (8)$$

$$\tau_e = \begin{cases} \frac{a[a+\cos\phi]\tau}{1+2a\cos\phi+a^2}, 0 \leq \tau < \frac{[1+2a\cos\phi+a^2]d}{2[1+a\cos\phi]} \\ \frac{a[a+\cos\phi]d}{2[1+a\cos\phi]}, \frac{[1+2a\cos\phi+a^2]d}{2[1+a\cos\phi]} \leq \tau < 1 - \frac{(1-a^2)d}{2[1+a\cos\phi]} \\ \frac{a[a+\cos\phi](d/2+1-\tau)}{2+a\cos\phi-a^2}, 1 - \frac{(1-a^2)d}{2[1+a\cos\phi]} \leq \tau < 1 + \frac{d}{2} \\ 0, \tau \geq 1 + \frac{d}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\tau_e = \hat{\tau}_0 - \tau_0$ 为码片延迟跟踪误差; $\tau = \tau_i - \tau_0$ 为多径信号相对直达信号码相位延时。

2 VTL 算法结构模型

2.1 VTL 环路结构

传统的接收机跟踪环路为标量跟踪环 (Scalar Tracking Loop, STL), 跟踪通道之间相互独立。跟踪通道内码环鉴别器和载波环鉴别器分别计算出码相位误差和载波相位误差, 经环路滤波后调节本地信号。当某一卫星信号受到多径干扰时, 相应的跟踪通道码环和载波环鉴相误差增大, 该通道的伪距和伪距率误差也相应增大, 从而影响定位结果。该多径干扰信号不会影响其他通道的跟踪性能, 其他通道的正常跟踪结果也不能用来辅助该通道减轻多径干扰的影响。

VTL 架构的接收机跟踪环路如图 1 所示。在 VTL 结构中, 每一个跟踪通道不再独立形成一个跟踪环路, 在计算得到码相位误差和载波相位误差后不再直接反馈给本地信号, 而是作为观测量输入到

式中: δ_{cp} 和 ϕ_{ph} 为合成信号的码相位差异和载波相位差异; E 和 L 分别为超前和滞后支路相关幅值, $E = \sqrt{I_E^2 + Q_E^2}$, $L = \sqrt{I_L^2 + Q_L^2}$ 。

多径信号通过降低接收机码相位和载波相位的测量精度, 来影响接收机的信号跟踪性能。在锁相环跟踪稳定时, $\phi_{\text{ph}} = 0$, 可得由多径信号相对直达信号相位延迟所引起的载波相位的跟踪误差为:

$$\phi_e = \arctan \left[\frac{a \sin(\phi)}{1 + a \cos(\phi)} \right] \quad (9)$$

式中: $\phi_e = \hat{\phi}_0 - \phi_0$ 为载波相位延迟跟踪误差; $\phi = \phi_i - \phi_0$ 为多径信号相对直达信号的载波相位延时。

码环跟踪稳定时, $\delta_{\text{cp}} = 0$, 当接收机早晚码间距 $d \leq 1$ 码片, 且多径衰减系数 $a < 1$ 时, 码片延迟跟踪误差为:

EKF 中, 同时, 上一次定位结果作为状态量输入到 EKF 中, 通过 EKF 计算出当前接收机的位置和速度, 并把更新后的伪距和伪距率信息反馈回本地码数控振荡器 (Numeric Controlled Oscillator, NCO) 和载波 NCO, 调节本地信号。

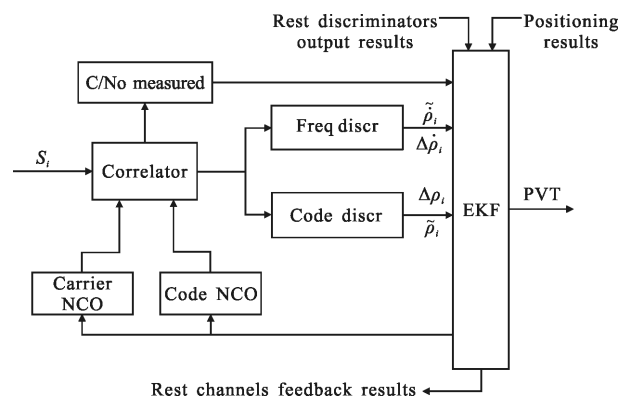


图 1 VTL 基本结构图

Fig.1 Basic structure of VTL

2.2 VTL 算法模型

在 VTL 结构中, EKF 的状态向量为接收机位置

误差、速度误差、加速度误差以及钟差和钟差漂移, 状态向量可写为 $X_k=[\Delta P_k, \Delta V_k, \Delta A_k, t_k, \dot{t}_k]^T$, 则状态方程为:

$$X_k = FX_{k-1} + w_{k-1} \quad (11)$$

式中: F 为状态转移矩阵, 如公式(12)所示。

$$F = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & T \times I_{3 \times 3} & 0.5T^2 \times I_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0 & I_{3 \times 3} & T \times I_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: w_{k-1} 为过程噪声, 均值为 0, 且满足 $E[w_i w_j^T] = Q_i \delta_{ij}$; I 为单位矩阵; T 为状态更新时间。

EKF 的观测向量为伪距误差和伪距率误差, 可以写为 $Y_k=[\Delta \rho_1, \dots, \Delta \rho_N, \Delta \dot{\rho}_1, \dots, \Delta \dot{\rho}_N]^T$, N 为接收机观测到的卫星数目, 测量方程为:

$$Y_k = C X_k + v_k \quad (13)$$

C 为观测矩阵, 如公式(14)所示:

$$C = \begin{bmatrix} l_x^1 & l_y^1 & l_z^1 & 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times 3} & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_x^N & l_y^N & l_z^N & 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times 3} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_x^1 & l_y^1 & l_z^1 & 0_{1 \times 3} & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & l_x^N & l_y^N & l_z^N & 0_{1 \times 3} & 0 & -1 \end{bmatrix}_{2N \times 11} \quad (14)$$

式中: v_k 为观测噪声, 均值为 0, 且满足 $E[v_i v_j^T] = R_i \delta_{ij}$, $l=[a_x^i, a_y^i, a_z^i]^T$ 为用户接收机指向第 i 颗卫星的单位矢量余弦。

由公式(5)和(7)可以分别计算出跟踪通道的码相位误差和载波频率误差, 再根据公式(15)可以计算得到伪距测量误差 $\Delta \tilde{\rho}$ 和伪距率测量误差 $\Delta \tilde{\dot{\rho}}$:

$$\begin{cases} \Delta \tilde{\rho} = \tau_e \cdot c / f_{PN} \\ \Delta \tilde{\dot{\rho}} = -\Delta f \cdot c / f_L \end{cases} \quad (15)$$

式中: τ_e 为码相位误差; Δf 为载波频率误差; f_{PN} 为伪码的码速率; f_L 为卫星信号载波频率; c 为光速。

根据系统模型, EKF 的实现过程如下所示。

预测误差方差:

$$P_{k|k-1} = F P_{k-1|k-1} F^T + Q_k \quad (16)$$

一步预测方程:

$$\hat{X}_{k|k-1} = F \hat{X}_{k-1} \quad (17)$$

卡尔曼增益:

$$K_k = P_{k|k-1} C_k^T (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k)^{-1} \quad (18)$$

估计误差方差:

$$P_{k|k} = (I - K_k C_k) P_{k|k-1} \quad (19)$$

状态估计方程:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Y_k - C_k \hat{X}_{k|k-1}) \quad (20)$$

在得到更新后的状态向量 \hat{X}_k 后, 可以由公式(21)计算得到更新后的伪距和伪距率误差的估计值:

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{\rho} \\ \vdots \\ \Delta \hat{\dot{\rho}} \end{bmatrix} = H \cdot \hat{X} \quad (21)$$

同时, 由公式(22)可以计算得到更新后的伪距和伪距率的估计值:

$$\begin{cases} \hat{\rho}_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_u)^2 + (y_i - \hat{y}_u)^2 + (z_i - \hat{z}_u)^2} + c \hat{t}_k \\ \vdots \\ \hat{\rho}_i = \frac{1 - \frac{1}{c} [v_i - \hat{v}_u \cdot a_i]}{1 + \hat{t}_k} \cdot \lambda_L \end{cases} \quad (22)$$

式中: 下标 i 代表第 i 颗卫星; $\hat{\rho}_i$ 和 $\hat{\dot{\rho}}_i$ 为更新后的伪距和伪距率估计值; $[x_i, y_i, z_i]^T$ 、 v_i 为卫星的位置和速度; $[\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u]^T$ 和 \hat{v}_u 分别为更新后接收机位置和速度; λ_L 为载波波长; c 为光速。

接收机环路跟踪输入为:

$$\begin{cases} \Delta \hat{\rho}^+ = \hat{\rho} + \Delta \hat{\rho} - \tilde{\rho} \\ \vdots \\ \Delta \hat{\dot{\rho}}^+ = \hat{\dot{\rho}} + \Delta \hat{\dot{\rho}} - \tilde{\dot{\rho}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\Delta \hat{\rho}^+$ 和 $\Delta \hat{\dot{\rho}}^+$ 分别为码环和载波环跟踪输入。

3 仿真结果与分析

仿真部分采用 GPS 的 L1 波段信号, 中频频率为 4.092 MHz, 采样频率为 16.368 MHz。为了充分验证多径信号对 VTL 的影响, 仿真分为两部分, 第一部分对多径信号所引起的码鉴相误差和载波相位鉴相误差进行了仿真分析; 第二部分对比分析在多径环境下 (单通道和多通道受多径影响), 多径信号对 VTL 和 STL 的影响。在所有仿真中, 假设多径信号和直达信号具有相同的载波频率和多普勒频偏, 并且直达信号载波幅度 $A=1$ 不变。

3.1 多径鉴相误差仿真

该部分主要从多径信号相对直达信号的幅度、码相位延迟以及载波相位延迟 3 个方面来仿真多径信号所引起的码鉴相误差和载波相位鉴相误差。一般情况下,接收机的早晚码间距 $d \leq 1$ 码片,且接收到的多径信号多径衰减系数 $a < 1$,文中只针对该情况进行仿真分析,并设早晚码间距 $d=0.7$ 码片。

图 2 是不同幅度下多径相对载波相位延迟对载波相位测量误差的影响。从图中可以看出,在相对载波相位延迟 ϕ 相同的情况下,多径衰减系数 a 越大,载波相位测量误差越大。当 $a=1$ 且 $\phi=\pi$ 时,由多径信号所引起的载波相位测量误差 $\phi_e=0.5\pi$ 达到最大,即 0.25 个波长(对 L1 波段信号来说,约 4.8 cm),对定位精度影响不大。

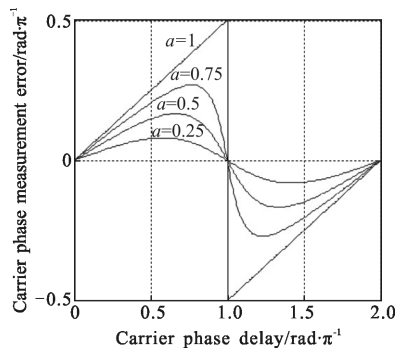


图 2 不同幅度下多径相对载波相位延迟对载波相位测量误差影响
Fig.2 Multipath relative carrier phase delay effect on carrier phase measurement error in different amplitudes

图 3 是不同码相位延迟下多径相对载波相位延迟对码相位测量误差的影响。图中多径衰减系数 $a=0.5$,在多径信号相对码相位延迟 τ 和多径衰减系

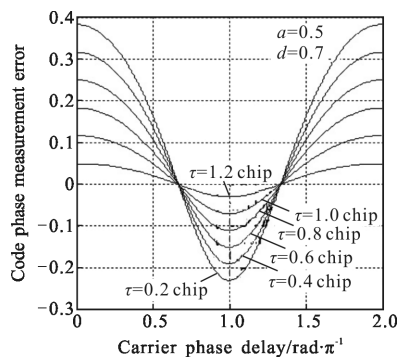


图 3 不同码延迟下多径相对载波相位延迟对码相位测量误差影响
Fig.3 Multipath relative carrier phase delay effect on code phase measurement error in different code delays

数 a 相同的情况下,随着相对载波相位延迟 ϕ 的变化,码相位测量误差 τ_e 变化十分明显,当 $\phi=\arccos(-a)$ 以及 $\phi=\arccos(-a)+\pi$ 时,由多径信号所引起的码相位测量误差绝对值最小为 0。

图 4 是描述的是不同幅度下,多径信号相对码相位延迟对码相位测量误差的影响。为方便分析,设定多径信号相对载波相位延迟 $\phi=0$,由多径信号相对码相位延迟所引起的码相位测量误差与早晚码间距 d 密切相关,从图 4 可知,当 $\phi=0$ 时,多径信号所能引起的最大码相位误差 $\tau_e=0.5ad$,并且当相对码相位延迟 $\tau \geq 1+0.5d$ 时,多径信号引起的码相位测量误差为 0。

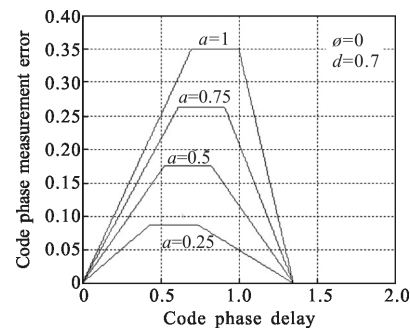


图 4 不同幅度下多径相对码相位延迟对码相位测量误差影响
Fig.4 Multipath relative code phase delay effect on code phase measurement error in different amplitudes

图 5 是多径信号不同相对载波相位延迟下,相对码相位延迟对码相位测量误差的影响。从图中可以看出,当 $\phi=\pm\pi, \phi=0$ 时,码相位测量误差值分别达到最小和最大。

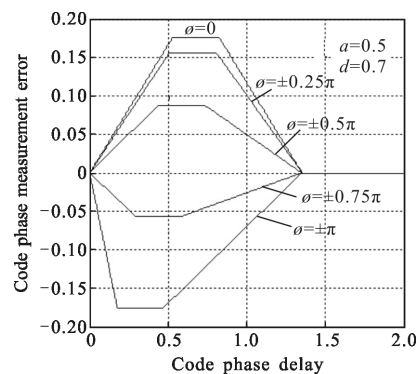


图 5 不同载波相位下多径相对码相位延迟对码相位测量误差影响
Fig.5 Multipath relative code phase delay effect on code phase measurement error in different relative carrier phase delays

从以上分析可以得出,由多径信号所引起的载波相位测量误差对定位精度影响较小,不同多径信号的幅度、延时、相位所引起的码相位测量误差较大,尤其是短延时的多径信号,严重影响接收机定位精度。

3.2 多径信号对 VTL 和 STL 影响

由上述分析可知,多径信号影响定位精度的本质是增大码相位测量误差,因此,分析多径信号对 VTL 和 STL 定位精度的影响,只需在不同码相位测量误差时,对比分析 VTL 和 STL 的定位精度即可。

当接收机早晚码间距 $d=0.7$ 码片,且多径衰减系数 $a<1$ 时,由多径信号所引起起的最大码相位测量误差为 0.35 码片。在该仿真中,接收机处于静止状态,通过不断改变多径信号的幅度、延时和相位使得受干扰通道的码相位测量误差在 0~0.35 码片之间变化,其他未受多径信号影响的通道存在较小的码相位测量误差(0.025 码片之内)。

首先,在单个跟踪通道受多径信号干扰时,对比分析该多径信号对 VTL 和 STL 的影响。图 6 为不同可见卫星下,单通道受多径干扰所引起的码相位测量误差对定位精度的影响。从图 6 可以看出,当受干扰通道码相位测量误差增大时,在可见卫星 N 相同的情况下,VTL 和 STL 的定位精度都随之恶化;当码相位测量误差相同时,可见卫星 N 越多,定位误差越小;在相同条件下,VTL 受干扰通道由于受到其他通道辅助,定位精度要优于 STL。

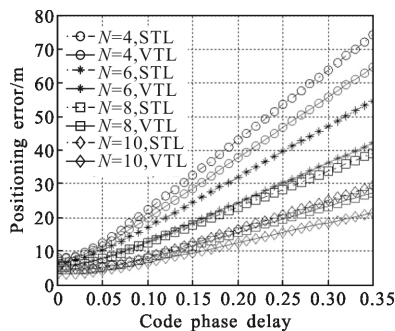


图 6 不同可见卫星下单通道码相位测量误差对定位精度的影响
Fig.6 Positioning error caused by code measurement error with one channel in different visible satellites

图 7 是在可见卫星数相同的情况下,不同多径干扰通道对 VTL 和 STL 定位精度的影响。不失一般性,假设受干扰通道中,由多径引起的码相位测量误差相同。图 7 中,可见卫星数目 $N=10$,分别对比分析

了有 1~4 个通道受多径干扰时,VTL 和 STL 的定位误差。从图中可以看出,随着受干扰通道的增加,VTL 定位精度会加速恶化,最终在所有跟踪通道受多径干扰都较严重时,VTL 定位误差和 STL 定位误差基本相似,仍不差于 STL。

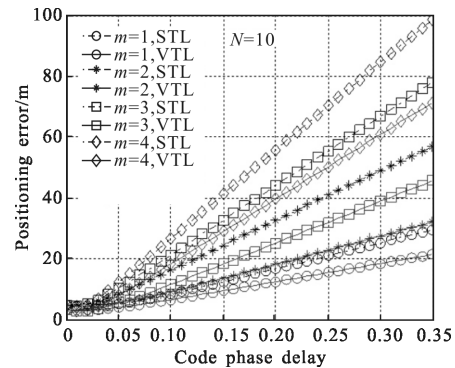


图 7 不同可见卫星下多通道码相位测量误差对定位精度的影响
Fig.7 Positioning error caused by code measurement error with mult-channel in different visible satellites

4 结 论

文中从多径信号的幅度、延时和相位等特征入手,分析了由多径信号所引起的码相位测量误差和载波相位测量误差,并推导了码相位测量误差对 VTL 定位精度的影响。通过仿真分析证明,短延时的多径信号对定位精度影响较大,可见卫星数目越多,多径所引起的定位误差越小。在单通以及少数通道受到短延时多径影响时,VTL 定位精度要明显优于 STL,当所有通道都受多径干扰较严重时,VTL 定位误差和 STL 定位误差比较接近,VTL 定位精度不差于 STL。

参考文献:

- [1] Van Dierendonck A J, Fenton P, Ford T. Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver [J]. *Navigation*, 1992, 39(3): 265-283.
- [2] Ren Jiawei, Chen Huihua, Jia Weimin, et al. Optimum design of code discriminator for GNSS based on multi-correlator structure [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(6): 1297-1302. (in Chinese)
任嘉伟,陈辉华,贾维敏,等.多相关器结构 GNSS 码鉴相器最优化设计 [J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(6): 1297-1302.

- [3] Li Chunyu, Zhang Xiaolin. Multipath mitigation method of GPS signals based on blind [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(1): 46–52. (in Chinese)
李春宇, 张晓林. 基于盲判决反馈均衡的 GPS 信号多径干扰抑制方法[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 46–52.
- [4] Cui Fayi, Xie Wenxiao. Algorithm of GPS phase smoothing pseudo-range based on adaptive attenuation factor Kalman filtering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 377–383. (in Chinese)
崔法毅, 解文肖. 基于自适应衰减因子 Kalman 滤波的 GPS 相位平滑伪距算法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 377–383.
- [5] Ho T J. Robust urban wireless localization: synergy between data fusion, modeling and intelligent estimation [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14 (2): 685–697.
- [6] Liu Jing, Cui Xiaowei, Lu Mingquan, et al. Multipath rejection performance comparison of GNSS receivers using scalar and vector architectures [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2013, 53(7): 961–966. (in Chinese)
刘婧, 崔晓伟, 陆明泉, 等. 标量和矢量架构下 GNSS 接收机多径抑制性能比较[J]. 清华大学学报, 2013, 53(7): 961–966.
- [7] Liu Yangyang, Lian Baowang, Zhao Hongwei, et al. Implementation of a vector tracking loop in resisting effect of near-far problem [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2228–2233. (in Chinese)
刘洋洋, 廉保旺, 赵宏伟, 等. 矢量跟踪算法在抗远近效应中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2228–2233.
- [8] Luo Yu, Wang Yongqing, Wu Siliang, et al. Multipath effects on vector tracking algorithm for GNSS signal [J]. *Science China*, 2014, 57: 102312–1–102312–13. (in Chinese)