

长码快速直接捕获中卫星信号传播时延估计^{*}

王梦丽 王飞雪

(国防科学技术大学电子科学与工程学院卫星导航定位研发中心 长沙 410073)

摘 要 卫星导航定位系统中, 辅助长码快捕的一个最重要的信息是时间信息, 卫星信号传播时延估计是提供先验时间信息, 减少时域搜索范围的一个重要方面. 基于用户和卫星的概略位置, 给出了适用于不同类型导航星和不同用户场景的卫星信号传播时延估计算法. 数值计算表明, 算法能够大大压缩不同导航星和不同场景用户之间传播时延的不确定范围, 即使在用户与卫星位置误差较大的恶劣应用背景下也能将不确定范围压缩一半, 从而有效地辅助长码快捕的实现.

关键词 长码快捕; 传播时延; 不确定范围; 位置误差

中图分类号 V 412

Estimation of Satellite Signal's Propagation Delay for Fast and Direct Acquisition of Long Cycle and High Rate Pseudo-Random Code

WANG Mengli WANG Feixue

(Satellite Navigation and Positioning Research and Development Center,
National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract In satellite navigation and positioning system, time is important information for fast and direct acquisition of long cycle code, one of its important aspects is the uncertainty compression of signal's propagation delay to reduce time search range. Based on coarse data of positions of user and satellite, estimation algorithms of propagation delay between different satellites and users are given. Simulation results indicate that the algorithm can reduce the delay's uncertainty range greatly, even with great position errors the uncertainty range still can be reduced to the half, and is effective for the fast acquisition of long cycle code.

Key words Fast and direct acquisition of long cycle code, Propagation delay, Uncertainty range, Position error

1 引言

卫星导航定位系统中长码的捕获通常是通过短码引导实现的. 如 GPS 中 P(Y) 码的捕获就是在捕

获 C/A 码的基础上, 根据 C/A 码携带的接力字确定该时刻 P(Y) 码的初始相位, 从而捕获 P(Y) 码. 由于短码抗干扰能力差, 在“导航战”所要求的对抗环境下长码的捕获不能再依赖短码, 必须进行长码

^{*} 新世纪优秀人才支持计划资助 (NCET-04-0995)
2006-06-09 收到原稿, 2007-01-22 收到修定稿

的快速直接捕获(简称长码快捕). 然而长码的长周期和高码速大大增加了长码快捕的难度. 如果没有先验知识, 实现长码的快速直接捕获几乎是不可能的^[1].

一般直序扩频码信号的捕获包括在时域和频域的2维搜索过程, 目的是实现接收码与本地码的粗同步过程. 时域和频域的不确定性决定了进行捕获时需要搜索的不确定范围. 长码快捕中时域不确定性主要来自卫星信号的传播时延和用户与卫星的时钟差^{[2]~[4]}. 文献^{[2]~[5]}都指出长码快捕中首先要根据用户和卫星的概略位置和时间信息估计时域的不确定范围, 但没有对这个问题进行深入研究. 文献^[6]以温启动状态下的长码快捕为应用背景, 以地面静止用户和GPS卫星为例, 分析了基于用户和卫星概略位置估计卫星信号传播时延的方法. 本文在文献^[6]的基础上, 针对不同场景的用户, 分析了温启动状态下卫星信号传播时延估计算法. 数值计算表明, 本文的算法应用于MEO和GEO等不同导航星和地面、空中等不同应用场景的用户, 均能大大压缩卫星信号传播时延的不确定范围, 即使用户水平位置误差和卫星的位置误差均达到1000km也能将不确定范围压缩一半, 从而有效地辅助长码快捕的实现.

2 卫星信号传播时延估计

卫星信号的传播时延是指信号从卫星发射到用户设备接收所经过的时间, 它首先取决于用户与卫星之间的距离, 还受大气传播延迟和Sagnac效应等因素的影响. 电离层对L频段卫星信号传播时延的影响最大在150m左右, 对流层的影响最大在60m左右, Sagnac效应的影响不超过3m^[7]. 用户和卫星的动态性对传播时延的影响, 即使速度为几十马赫的高动态用户也不超过1km. 本文中这些因素对传播时延的影响远小于用户与卫星概略位置误差的影响, 因此, 予以忽略.

地固坐标系中卫星与用户3维位置向量分别为 $P_s = [x_s \ y_s \ z_s]$ 和 $P_u = [x_u \ y_u \ z_u]$, 卫星信号的传播时延

$$\tau = |P_s - P_u|/c = \frac{\sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2}}{c}. \quad (1)$$

其中, $c = 3 \times 10^8$ m/s 为真空光速.

卫星信号传播时延估计是当用户与卫星位置分别在其概略范围内取值时, 根据式(1)计算信号传播时延并寻找最大值和最小值.

2.1 卫星与用户的概略位置

接收机的启动状态一般分为冷启动、温启动、热启动和重捕获状态. 长码快捕的实现与接收机实施捕获的状态有关. 冷启动状态下, 卫星没有可用的先验位置和时间信息, 经较长时间的漫天搜索后才能实现卫星信号的捕获; 在热启动和重捕获状态下, 卫星与用户有较为精确的位置和时间信息, 实现长码快捕比较容易^[2]. 本文以一般捕获状态即温启动状态下的长码快捕为应用背景.

温启动状态下, 用接收机中存储的历书或星历数据推算当前卫星位置作为卫星的中心位置, 根据历书或星历的不同龄期, 摄动、钟差等因素导致的卫星位置误差可以在几公里到几百公里. 以中高轨道MEO卫星为例, 摄动力使卫星偏离预定轨道的误差3h可达到2km, 两天可达到20km, 1周或更长的时间可达到上百公里^{[8],[9]}.

根据实际应用场景估计用户的位置, 其水平不确定范围可在几公里到几百公里, 甚至更大. 以我国青海省为例, 东西、南北最大距离分别约为1400km和800km, 若仅知用户位于青海省, 以青海省中心位置作为用户水平中心位置 U , 则水平位置误差取为700km. 另外, 根据飞机、舰船、导弹、战车、低轨卫星等不同应用场景估计用户高程及高程误差, 在用户应用场景已知的情况下高程误差一般不会超过几十公里. 以飞机为例, 由于飞机飞行高度一般不超过20km, 因此以10km为用户中心位置高程值, 高程误差取为10km.

2.2 传播时延估计算法

假设卫星中心位置 S 与用户中心位置 U 的距离为 D_{su} ; 卫星的概略位置在以中心位置 S 为球心, Δr_s 为半径的球体上. 用户中心位置 U 的经纬度和高度分别为 L_0, B_0, H_0 , 水平误差半径为 Δr_{up} , 高程误差半径为 Δr_{uh} , 用户的概略位置范围根据不同的应用场景有所不同. 以下对不同应用场景的用户分别说明.

1. 高程或水平位置已知的用户

(1) 高程已知的用户($\Delta r_{uh} = 0$)

将文献^[6]中对地面用户卫星信号传播时延估计算法的结论扩展到所有高程已知的用户类型. 在

用户概略位置范围内各点的经纬度(弧度)和高度值为

$$\begin{aligned} L &= L_0 + \frac{\Delta r_{up} \cos \alpha}{(R_e + H_0) \cos B_0}, \\ B &= B_0 + \frac{\Delta r_{up} \sin \alpha}{(R_e + H_0)}, \\ H &= H_0. \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\alpha = [0, 2\pi)$ 描述用户概略位置的变化范围, R_e 为地球半径(假设地球为理想球体^[6]). 当卫星与用户分别在其概略位置范围内变化时, 信号传播时延的最大值和最小值分别为

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= (R_{u,\max} + \Delta r_s)/c, \\ \tau_{\min} &= (R_{u,\min} - \Delta r_s)/c. \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $R_{u,\max}$ 和 $R_{u,\min}$ 分别为卫星中心位置 S 到用户概略位置范围各点距离的最大值和最小值. 详细分析参见文献[6].

(2) 水平位置已知的用户 ($\Delta r_{up} = 0$)

用户高程 H 的取值范围为

$$[H_0 - \Delta r_{uh}, H_0 + \Delta r_{uh}],$$

同样用式(3)计算卫星信号传播时延的最大值和最小值. 其中, $R_{u,\max}$ 和 $R_{u,\min}$ 分别为用户高程 H 在 $[H_0 - \Delta r_{uh}, H_0 + \Delta r_{uh}]$ 中取值时, 卫星中心位置 S 到用户概略位置距离的最大值和最小值. 如果 $H_0 < \Delta r_{uh}$ 且已知用户位置在水平面以上, H 的取值范围压缩为 $[0, H_0 + \Delta r_{uh}]$.

2. 高程与水平位置均未知的用户

用户概略位置范围在球心为 U , 三个半轴分别为 Δr_{ux} , Δr_{uy} 和 Δr_{uh} 的椭球体上. 其中, $\Delta r_{ux} = \Delta r_{uy} = \Delta r_{up}$. 沿 U 点纬线和经线的切线方向分别为 x 轴和 y 轴, 高程方向为 z 轴, Δr_{up} 和 Δr_{uh} 沿这三个方向的分量之和近似为 $\Delta x = \Delta r_u \cos \beta \cos \alpha$, $\Delta y = \Delta r_u \cos \beta \sin \alpha$, $\Delta z = \Delta r_u \sin \beta$, 因此用户概略位置范围内各点的经纬度(弧度)和高度值近似为

$$\begin{aligned} L &= L_0 + \frac{\Delta r_u \cos \beta \cos \alpha}{(R_e + H_0) \cos B_0}, \\ B &= B_0 + \frac{\Delta r_u \cos \beta \sin \alpha}{R_e + H_0}, \\ H &= H_0 + \Delta r_u \sin \beta. \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\Delta r_u = \frac{\Delta r_{up} \Delta r_{uh}}{\sqrt{\Delta r_{uh}^2 \cos^2 \beta + \Delta r_{up}^2 \sin^2 \beta}}$, 以 α 和

β 描述用户概略位置的变化范围. 当 α 和 β 分别在 $[0, 2\pi)$ 和 $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ 范围内变化时, 可以使用户的概

略位置 (L, B, H) 取遍误差最大处的整个椭球面. 根据用户中心位置高程与用户高程误差的大小关系, 有图1和图2所示两种情形.

情形一 用户概略位置范围所在椭球与地面不相交 ($\Delta r_{uh} \leq H_0$).

如图1所示, 用户概略位置范围内各点均在地面以上. 假设用户概略位置范围内与 S 距离最远点为 B , A' 为卫星概略位置范围内任意一点, 有 $BA > BA'$, 用户与卫星概略位置范围内距离最远点必过 S 点; 假设用户概略位置范围内与 S 距离最近点为 C , D' 为卫星概略位置范围内任意一点, 有 $CD < CD'$, 用户与卫星概略位置范围内距离最近点必过 S 点. 因此, 传播时延的最大值 $\tau_{\max}$ 和最小值 $\tau_{\min}$ 分别为

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= (R_{u,\max} + \Delta r_s)/c, \\ \tau_{\min} &= (R_{u,\min} - \Delta r_s)/c. \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $R_{u,\max}$ 和 $R_{u,\min}$ 分别为卫星在其中心位置 S 处固定, 用户位置 (L, B, H) 按照式(4)取遍椭球面上各点时与卫星 S 距离的最大值和最小值.

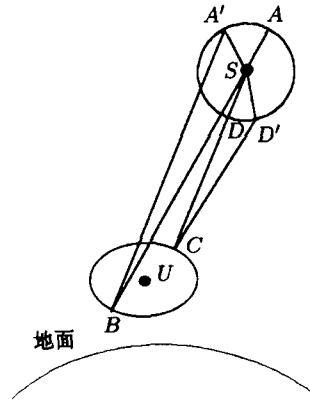


图1 用户不确定范围均位于地面以上

Fig.1 User's uncertainty range hyper-ground

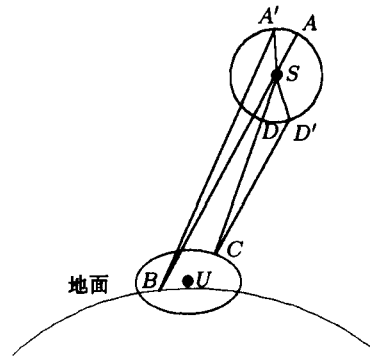


图2 用户不确定范围与地面相交

Fig.2 User's uncertainty range intersects ground

特别是, 当 $\Delta r_{up} = \Delta r_{uh} = \Delta r_u$ 时, $\tau_{max} = [D_{SU} + (\Delta r_s + \Delta r_u)]/c$, $\tau_{min} = [D_{SU} - (\Delta r_s + \Delta r_u)]/c$.

情形二 用户概略位置范围所在椭球与地面相交 ($\Delta r_{uh} > H_0$).

如图 2 所示, 如果根据应用场景或用户类型不能确定用户位置在水平面以上或用户高程误差半径较小时, 计算方法同情形一. 如果已知用户位置在水平面以上, 用户的概略位置只取水平面以上的点以进一步压缩卫星信号传播时延范围, 这种情况下用户与卫星概略位置范围内距离最大和最小的点也都过 S 点. 同样用式 (5) 可以计算卫星信号传播时延的最大值 τ_{max} 和最小值 τ_{min} . 不同的是, 按照式 (4) 计算椭球面上各点用户位置 $U(L, B, H)$ 时, 如果 $H < 0$, 则令 $H = 0$.

特别是, 当 $\Delta r_{up} = \Delta r_{uh} = \Delta r_u$ 时, $\tau_{max} = (R_{u,max} + \Delta r_s)/c$, $\tau_{min} = [D_{SU} - (\Delta r_s + \Delta r_u)]/c$.

3 算例

以 MEO 和 GEO 卫星为例, 卫星和用户中心位置的取值 (都以经纬度和高度表示) 满足观测仰角为 40° 和 90° , 分别代表卫星和用户两种典型的相对位置. 另外, $R_e = 6378 \text{ km}$, τ_0 为信号传播时延的中心值, $\Delta\tau_{max}$ 和 $\Delta\tau_{min}$ 分别为在相应误差条件下传播时延偏离 τ_0 的最大值和最小值.

算例 1 MEO 卫星中心位置 S 为 (120.0°E , 0°N , $21\,528.85 \text{ km}$).

用户中心位置 U 为 (120.0°E , 39.41°N , 50 km) 时, 卫星观测仰角为 40° , $\tau_0 = 73.166 \text{ ms}$; 用户中心位置 U 为 (120.0°E , 0.0°N , 50 km) 时, 卫星观测仰角为 90° , $\tau_0 = 71.596 \text{ ms}$. 表 1 和表 2 分别给出了 MEO 卫星观测仰角为 40° 和 90° 时, 各项位置误差对传播时延的影响.

表 1 MEO 卫星仰角为 40° 时各项位置误差对传播时延的影响

Table 1 Position errors' effects on propagations of MEO with 40° elevation

Δr_{up} /km	Δr_s /km	$\Delta r_{uh} = 0 \text{ km}$		$\Delta r_{uh} = 10 \text{ km}$		$\Delta r_{uh} = 50 \text{ km}$	
		$\Delta\tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{min}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{min}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{min}/\text{ms}$
10	10	0.0426	-0.0426	0.0649	-0.0649	0.185	-0.185
50	50	0.214	-0.213	0.222	-0.222	0.325	-0.325
100	100	0.428	-0.424	0.433	-0.429	0.511	-0.510
500	500	2.192	-2.081	2.192	-2.081	2.210	-2.112
1000	1000	4.524	-4.085	4.525	-4.085	4.527	-4.103

表 2 MEO 卫星仰角为 90° 时各项位置误差对传播时延的影响

Table 2 Position errors' effects on propagations of MEO with 90° elevation

Δr_{up} /km	Δr_s /km	$\Delta r_{uh} = 0 \text{ km}$		$\Delta r_{uh} = 10 \text{ km}$		$\Delta r_{uh} = 50 \text{ km}$	
		$\Delta\tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{min}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{min}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{min}/\text{ms}$
10	10	0.0334	-0.0333	0.0667	-0.0667	0.200	-0.200
50	50	0.168	-0.166	0.200	-0.200	0.333	-0.333
100	100	0.337	-0.332	0.367	-0.367	0.500	-0.500
500	500	1.751	-1.635	1.751	-1.700	1.833	-1.833
1000	1000	3.669	-3.208	3.669	-3.367	3.688	-3.500

表 3 GEO 卫星仰角为 40° 时各项位置误差对传播时延的影响

Table 3 Position errors' effects on propagations of GEO with 40° elevation

Δr_{up} /km	Δr_s /km	$\Delta r_{uh} = 0 \text{ km}$		$\Delta r_{uh} = 10 \text{ km}$		$\Delta r_{uh} = 50 \text{ km}$	
		$\Delta\tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{min}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{min}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta\tau_{min}/\text{ms}$
10	10	0.0486	-0.0485	0.0680	-0.0680	0.190	-0.190
50	50	0.244	-0.242	0.250	-0.248	0.340	-0.340
100	100	0.491	-0.481	0.494	-0.484	0.553	-0.550
500	500	2.552	-2.311	2.552	-2.311	2.562	-2.334
1000	1000	5.352	-4.389	5.353	-4.389	5.353	-4.409

表 4 GEO 卫星仰角为 90° 时各项位置误差对传播时延的影响
Table 4 Position errors' effects on propagations of GEO with 90° elevation

Δr_{up} /km	Δr_s /km	$\Delta r_{uh} = 0 \text{ km}$		$\Delta r_{uh} = 10 \text{ km}$		$\Delta r_{uh} = 50 \text{ km}$	
		$\Delta \tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta \tau_{min}/\text{ms}$	$\Delta \tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta \tau_{min}/\text{ms}$	$\Delta \tau_{max}/\text{ms}$	$\Delta \tau_{min}/\text{ms}$
10	10	0.0334	-0.0333	0.0667	-0.0667	0.120	-0.200
50	50	0.168	-0.166	0.120	-0.200	0.333	-0.333
100	100	0.338	-0.330	0.367	-0.367	0.500	-0.500
500	500	1.797	-1.590	1.797	-1.700	1.850	-1.833
1000	1000	3.867	-3.028	3.867	-3.367	3.879	-3.500

算例 2 GEO 卫星中心位置 S 为 (110.5°E, 0°N, 35 786.005 km).

用户中心位置 U 为 (110.5°E, 43.35°N, 50 km) 时, 卫星观测仰角为 40°, $\tau_0 = 120.350 \text{ ms}$; 用户中心位置 U 为 (110.5°E, 0.0°N, 50 km) 时, 卫星观测仰角为 90°, $\tau_0 = 119.120 \text{ ms}$. 表 3 和表 4 分别给出了 GEO 卫星观测仰角为 40° 和 90° 时, 各项位置误差对传播时延的影响.

实际应用中, 式 (2) 和式 (4) 中 α 和 β 的取值间隔可以在 5° ~ 10° 范围. 对比表 1~4 的数据可见, 用户高程误差在 50 km 以内. 当用户水平位置误差和卫星位置误差均为 100 km 时, 压缩后的卫星信号传播时延双边不确定范围在 1 ms 左右; 两者位置误差均达到 1000 km 时, 不确定范围在 10 ms 左右. 如果只根据卫星信号的覆盖范围估计卫星信号传播时延, MEO 卫星和 GEO 卫星的不确定范围均在 20 ms 左右. 可见, 基于概略位置的传播时延估计算法在用户和卫星位置误差较小时能将传播时延不确定范围大大压缩, 即使在位置误差较大的应用条件下也能将不确定范围压缩一半. 对于码速率为 10.23 Mbit/s 的 P(Y) 码, 半个码片对应的时间长度为 0.0489 μs , 1 ms 单边时间不确定范围就需要搜索 20 460 个单元. 因此, 时域不确定范围的减小大大压缩了时域搜索单元数, 能有效地辅助长码快捕的实现.

4 结语

针对不同场景的用户, 分析了基于用户与卫星概略位置的卫星信号传播时延估计算法. 该算法计算简单, 对于不同类型的导航星和不同应用场景的用户均能有效地压缩传播时延不确定范围. 由于

用户位置误差对传播时延的影响随仰角的增大而减小, 因此温启动状态下首先根据用户和卫星的先验位置和时间信息选择仰角最大的一颗卫星作为首捕卫星, 估计其传播时延不确定范围以辅助长码捕获; 信号捕获后就得到了最新的卫星历书, 从而很容易地捕获可视区内其他卫星信号.

本文的结论可用于不同卫星导航系统的飞机、舰船、导弹、战车、低轨卫星等各种接收机的长码快速直接捕获技术.

参考文献

[1] Dosh M *et al.* New millennium GPS receivers. In: Proceeding of ION GPS'99, 1999. 811~820
[2] Campanile J, Detachment N. GPS Acquisition Performance in the Presence of Jamming. In: Proceeding of ION GPS'99, 1999. 257~264
[3] Grant P, Spangenberg S, Scott I, McLaughlin S, Povey G, Cruickshank D. Doppler estimation for fast acquisition in spread spectrum communication systems. *IEEE ISSSTA*, 1998, 1:106~110
[4] Lozow J B. Analysis of direct P(Y) code acquisition. *Navig. J. ION*, 1997, 44(1): 89~98
[5] Yang C *et al.* Frequency-Domain Doppler Search and Jam-Suppression for Fast Direct P(Y)-Code Acquisition. In: Proceeding of ION GPS'99, 1999. 1157~1167
[6] Wang Mengli *et al.* Estimation of signal's propagation delay time based on user and satellite's coarse positions. *GNSS World China*, 2005, 4:1~4. in Chinese (王梦丽等. 基于用户和卫星概略位置的信号传播时延估计. 全球定位系统, 2005, 4:1~4)
[7] Elliott D K. Understanding GPS Principles and Applications. New York: Artech House, 1996. 243~244
[8] King R W. GPS Surveying. Beijing: Publishing Company of Liberation Army, 1988. in Chinese (King R W. GPS 测地. 北京: 解放军出版社, 1988. 61~66)
[9] Wolf R. Satellite Orbit and Ephemeris Determination Using Inter Satellite Links. Munchen: University of Bundeswehr, 2000. 19~68