基于卫星监视几何精度因子的 UDRE值估计方法

邵 搏 刘建胜 黄智刚 李 锐

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 星基增强导航系统(SBAS, Satellite Based Augmentation System)通过向用户提供用户差分距离误差(UDRE, User Differential Range Error),来保证广播星历和星钟改正数的精度并增强用户的完好性性能.给出了一种用于主控站的 UDRE计算方法,提出了卫星监视几何精度因子(SSDOP, Satellite Surveillance Dilution of Precision)的概念.基于 UDRE和 SSDOP的表达式,通过数学推导发现 UDRE受到 SSDOP和限制因子的影响,而限制因子可以用其统计平均值 0.7438来替代,建立了由 SSDOP估计 UDRE的表达式.仿真结果表明:利用 SSDOP估计出的 UDRE值,其误差不超过 0.8m,能够反映出当前卫星 UDRE的特性,可以作为用户在无法接收完好性信息时快速推算 UDRE的一种可行手段.

关 键 词: 星基增强导航系统; 用户差分距离误差; 卫星监视几何精度因子; 限制因子

中图分类号: TN 927

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2010)08-0900-04

UDRE estimation approach based on satellite surveillance dilution of precision

Shao Bo Liu Jiansheng Huang Zhigang Li Rui

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Satellite based augmentation system (SBAS) provides user differential range error (UDRE) which guarantees satellite ephemeris and clock correction accuracies to the users to enhance their integrity. A method of calculating UDRE only used in the master station was introduced, then a concept of satellite surveillance dilution of precision (SSDOP) was proposed to reflect the effect of changing the reference stations' distribution on the satellite ephemeris and clock correction accuracies. A mathematical equation was deduced from the SSDOP and UDRE expressions, and from the view of the equation the UDRE was infected by SSDOP and restriction factor which could be replaced by, 0.7438, its statistic average value. The equation based upon SSDOP to estimate UDRE was established. The simulation results show that the estimation value of UDRE based on SSDOP can reflect the performance of the current UDRE and its accuracy is less than 0.8m. This approach can be used as an alternative method to calculate the UDRE when the user can't receive the integrity information broadcasted by SBAS.

Key words: satellite based augmentation system; user differential range error; satellite surveillance dilution of precision; restriction factor

广播星历和星钟误差是造成用户定位精度下降的重要误差源,星基增强导航系统[1](SBAS, Satellite Based Augmentation System)通过对卫星导航系统空间段和传播段上的各类误差进行分类建模并计算出相应误差的改正数和改正精度,然后将计算结果向用户实时播发,以提高用户的定

收稿日期: 2009-06-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB731800); 国家自然科学基金资助项目(60879012)

作者简介: 邵 搏(1983-),男,河南郑州人,博士生, boris_shao@yahoo.cn

位精度. 同时还向用户提供用户差分距离误差(UDRE, User Differential Range Error), 来保证广播星历和星钟改正数的改正精度, 以增强用户的完好性性能.

对于 SBAS中 UDRE的计算方法已有学者进行了相应介绍[2], 但是该方法仅适用于 SBAS主控站. SBAS服务范围内的用户需要在无法接收到完好性信息的情况下, 对自身可见卫星的星历和星钟误差改正效果及时做出判断.

几何精度因子被广泛地用来衡量不同的卫星分布对用户定位精度的影响. 借鉴几何精度因子的定义[3], 本文提出卫星监视几何精度因子(SSDOP, Satellite Surveillance Dilution of Precision)的概念, SSDOP能够反映出不同的站星间观测布局对卫星广播星历及星钟估计精度的影响. 因此, 可通过 SSDOP来分析 UDRE.

文中分析了 SSDOP与 UDRE之间的关系, 并做了相应的仿真运算, 表明可利用 SSDOP对 UDRE做出较好的估计, 其估计值能够反映出当前卫星 UDRE的特性. 该方法可以作为用户在无法接收完好性信息时推算 UDRE的一种可行手段.

1　UDRE与 SSDOP间的关系

1.1　UDRE计算方法

本文采用最小二乘法并建立卫星运动模型[4], 利用监测站的观测量计算广播星历与星钟误差的改正数与改正精度, 通过误差改正精度计算出 UDRE值.

消除载波平滑伪距中的几何距离、卫星时钟偏差、监测站时钟误差、电离层时延和对流层时延后, 就得到伪距残差[2], 主控站将各个监测站的伪距残差作为输入量并利用最小二乘法解算广播星历与星钟误差改正数, 具体解算过程参见文献[5]. 在完成广播星历与星钟误差的解算后, 可得下列式子:

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{o}} = [\boldsymbol{H}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{o}}^{-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{s}}]_{3\times 3}^{-1} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{c}} = \left[\boldsymbol{H}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{o}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R})^{-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{c}}\right]_{1\times 1}^{-1} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{UDRE}} = \boldsymbol{R} + \boldsymbol{G}\hat{\boldsymbol{P}}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$\sigma_{\mathrm{UDRE}}^2 = \frac{1}{M}\mathrm{tr}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{UDRE}}) \tag{4}$$

其中, $\boldsymbol{P}_{\mathrm{o}}$表示广播星历误差改正精度; $\boldsymbol{P}_{\mathrm{c}}$表示星钟误差改正精度; $\boldsymbol{P}_{\mathrm{UDRE}}$表示广播星历与星钟误差估计值的协方差矩阵; $\boldsymbol{R} = \sigma^2\boldsymbol{I}_{M\times M}$, $\boldsymbol{R}_{\mathrm{o}} = 2\boldsymbol{R}$; M 表示观测到该卫星的监测站数目; σ^2为测量噪声方差; $\boldsymbol{G}$为观测矩阵, $\boldsymbol{G} = [\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}} \quad \boldsymbol{H}_{\mathrm{c}}]_{M\times 4}$, $\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}} = [\boldsymbol{l}_1^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{l}_2^{\mathrm{T}} \quad \cdots \quad \boldsymbol{l}_M^{\mathrm{T}}]_{M\times 3}^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{H}_{\mathrm{c}} = [1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1]_{M\times 1}^{\mathrm{T}}$; $\boldsymbol{H}_{\mathrm{s}} = [\boldsymbol{l}_1^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{l}_k^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{l}_2^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{l}_k^{\mathrm{T}} \quad \cdots \quad \boldsymbol{l}_M^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{l}_k^{\mathrm{T}}]_{(M-1)\times 3}^{\mathrm{T}}$; $\boldsymbol{l}_i^j(\boldsymbol{l}_k^j)$为监测站 i(主控站 k)到卫星 j的单位方向矢量; $\hat{\boldsymbol{P}} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_{\mathrm{o}} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{P}_{\mathrm{c}}\end{bmatrix}_{4\times 4}$; $\mathrm{tr}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{UDRE}})$表示对矩阵 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{UDRE}}$求迹.

利用式(4)可得到 UDRE的计算公式:

$$V_{\mathrm{UDRE}} = p\sigma_{\mathrm{UDRE}} \tag{5}$$

式中, p表示与置信度对应的分位数. 为保证误差估计的 99.9%的估计置信度, 一般取 $p = 3.29$.

1.2　SSDOP与 UDRE间的联系

由于监测站之间的分布将影响卫星广播星历及星钟的改正精度[5], 本文借鉴几何精度因子的定义, 提出了卫星监视几何精度因子(SSDOP)的概念, 利用 SSDOP来反映不同站星间的观测布局对卫星广播星历及星钟改正精度的影响. 由几何精度因子的定义[3], 可得 SSDOP的表达式:

$$V_{\mathrm{SSDOP}} = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_{\mathrm{b}}^2}}{\sigma} = \frac{\sqrt{\mathrm{tr}(\hat{\boldsymbol{P}})}}{\sigma} = \left\{2\,\mathrm{tr}\left[(\boldsymbol{H}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{s}})^{-1}\right] + \left[\boldsymbol{H}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}(2\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{s}})^{-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{H}_{\mathrm{c}}\right]^{-1}\right\}^{1/2} \tag{6}$$

其中, σ_x, σ_y和 σ_z分别表示在地心地固坐标系下, 在 XYZ三个方向上广播星历误差改正精度; σ_{b}表示星钟误差标准差, 即 P_{c}中元素的平方根.

根据矩阵迹的性质, 由式(4)可得下面的不等式:

$$\sigma_{\mathrm{UDRE}}^2 = \frac{1}{M}(M\sigma^2 + \mathrm{tr}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{o}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{T}}) + M\boldsymbol{P}_{\mathrm{c}}) < \frac{1}{M}(M\sigma^2 + \mathrm{tr}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{\mathrm{o}})\cdot\mathrm{tr}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{o}}) + M\boldsymbol{P}_{\mathrm{c}}) = \sigma^2 + \mathrm{tr}(\hat{\boldsymbol{P}}) \tag{7}$$

将式(5)和式(6)代入到式(7)中可得:

$$V_{\mathrm{UDRE}} < 3.29\sigma\sqrt{1 + V_{\mathrm{SSDOP}}^2} \tag{8}$$

从式(8)中可以看出, 如果使用 $3.29\sigma\sqrt{1+V_{\mathrm{SSDOP}}^2}$对 UDRE进行估计, 得到的估计值虽然也能反映出广播星历和星钟的改正精度, 但是与计算出的 UDRE值相比较, 该值显得过于保守.

为了避免将 UDRE估计得过大, 引入限制因子 α, 定义如下:

$$\alpha = \frac{V_{\mathrm{UDRE}}}{3.29\sigma\sqrt{1 + V_{\mathrm{SSDOP}}^2}} \tag{9}$$

其中, α的取值范围为 0< α< 1.

则式(8)可变为

$$V_{\mathrm{UDRE}} = \alpha \cdot 3.29\sigma \sqrt{1 + V_{\mathrm{SSDOP}}^2} \quad (10)$$

2 仿真分析

由式(10)可以看出, 在 σ 一定的情况下, UDRE由限制因子 α和 SSDOP两个因素决定. 因此, 只需求出限制因子 α就可以通过 SSDOP对 UDRE进行估计.

下面首先利用式(9)对限制因子进行仿真分析. 仿真环境为: ①仿真时间 86 400 s; ②仿真时间间隔 3 s; ③卫星类型及数目: 5颗 GEO(Geostationary satellite)卫星[6], 3颗 IGSO(Inclined Geosynchronous satellite)卫星[6](具有相同的星下点轨迹), 24颗 MEO(Medium Earth Orbiting satellite)卫星[3]; ④监测站高度截止角 15°; ⑤采用 11, 27, 36个同步监测站. 仿真结果如下.

从图 1可以看出, 在不同数量监测站分布下, 同一卫星的限制因子变化曲线重叠在一起, 说明 α的变化趋势不受监测站数量和分布的影响.

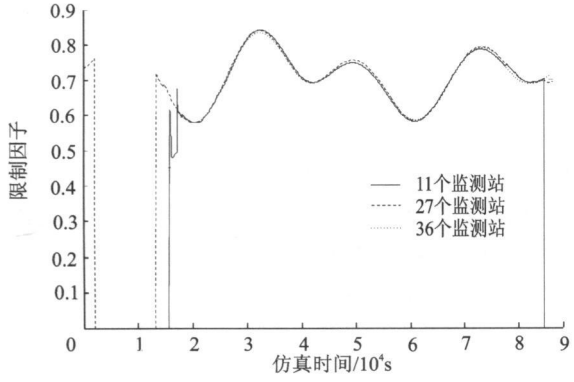


图 1 不同监测站下某颗 IGSO的限制因子变化曲线

图 2描述了 3颗 IGSO卫星分别在 71 000 s, 42 000 s和 13 000 s进入相同轨道区域后 α的变化曲线. 虽然这 3颗卫星具有相同的星下点轨迹, 但轨道参数不同, 导致它们进入相同轨道区域的时刻是不同的. 一旦这些卫星进入相同的区域它们的 α体现出相同的变化趋势, 但是随着卫星进入不同的区域 α产生不同的变动. 这表明 α的变化受到卫星的星下点轨迹经纬度的影响.

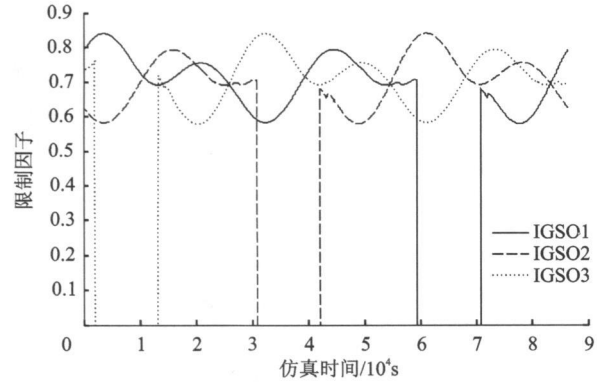


图 2 27个监测站下 3颗 IGSO的限制因子变化曲线

通过对 MEO和 GEO仿真, 发现其 α也具有上述规律, 即 α变化趋势不受监测站数量和分布的影响, 仅与卫星在大地坐标系中的经纬度有关. 通过计算机仿真发现, α变化规律如图 3所示.

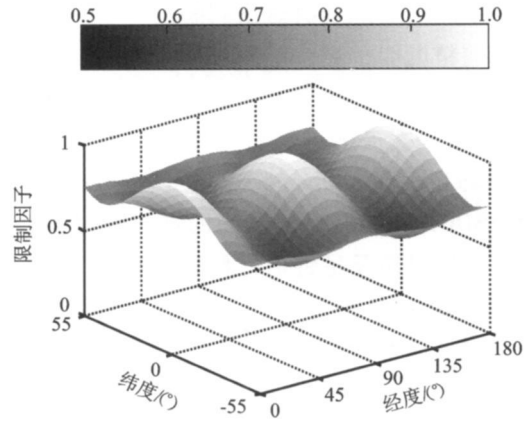


图 3 α的变化曲面

为便于利用 SSDOP对 UDRE进行估计, 将图 3所示数据进行统计, α的最大值、最小值和平均值分别为: 0.992 4, 0.582 8和 0.743 8. 将这 3个值分别代入式(10), 所得的 UDRE估计值对比关系如图 4所示, 图中"Max", "Mean"和"Min"分别表示最大、平均和最小限制因子下的 UDRE估计值.

从图 4中可以看出, 利用 α平均值计算出的 UDRE估计值能够较好的反映出当前卫星 UDRE的特性. 因此, 利用 α平均值并结合 SSDOP来估计 UDRE是较为理想的. 将 α= 0.743 8代入式(10)可得到当前时刻卫星的 UDRE估计值:

$$\hat{V}_{\mathrm{UDRE}} = 2.447\,1\sigma \sqrt{1 + V_{\mathrm{SSDOP}}^2} \quad (11)$$

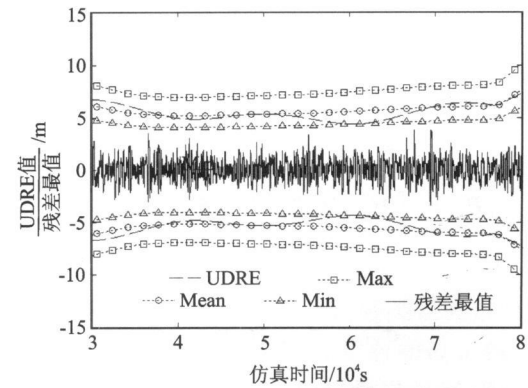


图 4 不同限制因子下的 UDRE估计值

3种卫星的 UDRE值及其估计值的对比关系, 如图 5、图 6和图 7所示. 图中结果显示, 利用

SSDOP能够对 UDRE做出较好的估计,估计精度小于 0.8m,并且该方法对不同种类的卫星都有较强的适用性.

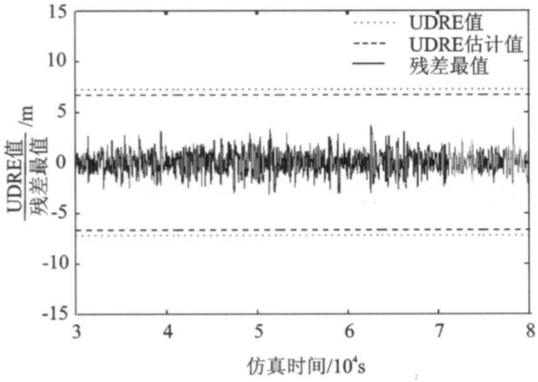


图 5　某颗 GEO的 UDRE值及其估计值

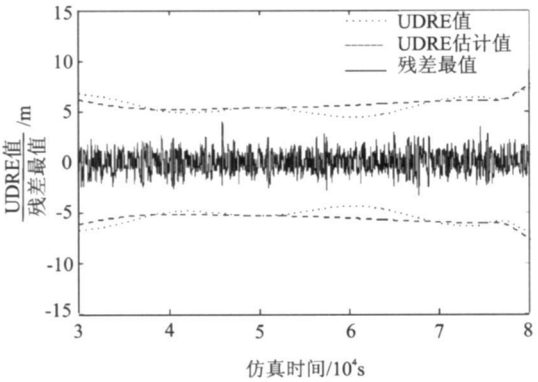


图 6　某颗 IGSO的 UDRE值及其估计值

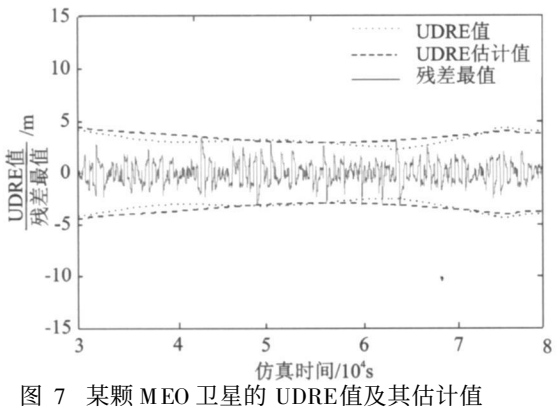


图 7　某颗 MEO卫星的 UDRE值及其估计值

3　结 束 语

文中提出了卫星监视几何精度因子(SSDOP)的概念,利用 SSDOP来反映不同站星间的观测布局对卫星广播星历及星钟估计精度的影响.并给出 SSDOP计算方法,计算过程简单,仅需要知道卫星与监测站间的单位方向矢量.然后分析了 SSDOP与 UDRE之间的关系,并做了相应的仿真分析.结果表明:利用 SSDOP能够对 UDRE做出较好的估计,该方法对不同种类的卫星都有较强的适用性,并且可以作为用户无法接收 SBAS播发的完好性信息时快速推算 UDRE的一种可行手段.

参考文献 (**References**)

[1] RTCA/DO-229D, Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment[S]. 2006: 3-6

[2] Yeou-Jyh Tsai. Wide area differential operation of the global positioning system: ephemeris and clock algorithms[D]. California Department of Mechanical Engineering, Stanford University, 1999

[3] Elliott D Kaplan, Christopher J Hegarty. Understanding GPS principles and applications[M]. 2nd ed. Norwood, MA: Artech House Inc, 2006: 322-327

[4] 钟慧敏,房建成.基于非线性模型预测滤波的微纳卫星定位方法[J].北京航空航天大学学报, 2008, 34(11): 1339-1342
Zhong Huimin, Fang Jiancheng. Novel method of position determination for low earth orbit erm icro-nano satellite based on nonrlinear model predict filter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(11): 1139-1342 (in Chinese)

[5] 马小辉.地面完好性通道(GIC)仿真技术研究[D].北京:北京航空航天大学电子信息工程学院, 2008
Ma Xiaohui. The research of the technique of simulation of ground integrity channel(GIC) [D]. Beijing: School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008(in Chinese)

[6] 谭述森.北斗卫星导航系统的发展与思考[J].宇航学报, 2008, 29(2): 391-396
Tan Shusen. Development and thought of compass navigation satellite system[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 391-396 (in Chinese)

(编　辑:董立君)