

一种区域卫星定位系统的星座方案

邓长明, 卓永宁, 吴廷勇, 吴诗其

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

【摘要】提出了一种用静止卫星和同步椭圆轨道卫星构造的区域卫星定位系统。并以GDOP最小化为目标,对该系统的星座参数进行了优化。利用仿真得到了该星座在我国的性能指标,并和GPS星座进行了比较。仿真结果表明,该方案能够满足我国及周边地区的卫星定位需要。

关键词 卫星定位; 卫星星座; 几何精度因子; 全球卫星定位系统
中图分类号 TN967.1 **文献标识码** A

Constellation of a Regional Satellite Navigation System

DENG Chang-ming, ZHUO Yong-ning, WU Ting-yong, WU Shi-qi

(School of Communication and Information Engineering, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

Abstract A regional satellite navigation system which is made up of geosynchronous satellites and synchronous satellites with elliptical orbit is proposed. The parameter of the constellation is optimized with the goal that the GDOP should be minimum. The performance of the constellation which is compared with GPS is obtained by simulation. The simulation shows this scheme can meet the requirements in china and its neighboring area.

Key words satellite positioning; satellite constellation; geometric dilution of precision; global position system

随着卫星导航在各领域应用的日益广泛,现在有多个国家准备在全球卫星定位系统(GPS)之外发展自己的卫星定位系统。在这些系统中既有全球卫星定位系统,如欧洲的伽利略(GALILEO)^[1],也有区域卫星定位系统,如日本具有导航功能的MTSAT^[2]。我国也已建成了北斗卫星定位系统,但该系统卫星数较少,不能提供实时三维定位。因此,要提供较好的定位服务,需要建立一个由更多卫星组成的区域定位系统。本文在考察了区域定位对卫星轨道的要求后,提出了基于无源伪距定位的、由2颗静止星和6颗椭圆同步轨道卫星组成的定位系统。

1 卫星定位的几何精度因子

卫星定位的几何精度因子(Geometric Dilution of Precision, GDOP)是衡量卫星与用户间的几何关系对定位影响的重要参数。它表示卫星定位结果对卫星的测量误差的放大程度。在三维定位及定时的定位系统中, GDOP的表达式^[3]为:

$$G_{\text{GDOP}} = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2}}{\sigma_\rho} \quad (1)$$

式中 $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_b^2$ 分别是在 x, y, z 方向上定位误差的方差以及时钟的误差的方差; σ_ρ 是测量误差的标准差。由式(1)可以看出 G_{GDOP} 实际上是定位误差和测量误差的比值。因此,在相同的测量误差下, G_{GDOP} 越小,定位误差就越小。所以,本文所提出的星座将以 G_{GDOP} 值最小化为目标对星座参数进行优化。

2 卫星轨道类型的选择

建造区域卫星定位系统,首先应考虑的是卫星在飞行周期内对目标区域实现尽可能长时间的覆盖。最能满足这个要求的是静止卫星。但是,对卫星定位系统而言,卫星和用户间的空间几何关系直接决定了 G_{GDOP}

收稿日期: 2005 - 01 - 07

作者简介: 邓长明(1980 -),男,硕士生,主要从事卫星通信方面的研究。

的大小。而如果定位卫星全部采用静止卫星,它们和用户的空间几何关系将对定位造成不利影响,所以有必要采用其他轨道类型的卫星。除静止卫星外,同步椭圆轨道卫星和回归轨道卫星也能够对特定区域提供长时间覆盖。两者中,同步椭圆轨道卫星覆盖时间更长,高度更大,能对目标区域提供高仰角覆盖。但由于它比回归轨道卫星高,所以所需的信号发射功率也更大。考虑到定位卫星的信号是单向传送,对高度要求没有通信卫星严格,因此可以选用同步椭圆轨道卫星和静止卫星组成区域定位星座。

3 静止卫星的参数选择

卫星轨道有6个参数,分别为轨道的半长轴 a 、轨道偏心率 e 、轨道倾角 i 、升交点赤经 Ω 、近地点幅角 ω 和平近点角 m (真近点角 f)。由于静止卫星的特殊性,它唯一的待定参数是升交点赤经 Ω ,即卫星下点的地理经度。 G_{GDOP} 虽是一个和统计相关的量,但它由卫星和用户间的几何关系唯一确定。在星座中,静止卫星对特定用户的位置不会变化。所以,为了简化星座的优化步骤,可以根据静止卫星和用户的几何关系对静止卫星的位置作局部优化。在伪距定位中,用户通过信号时延确定卫星到用户的距离。用户位置的解算过程,

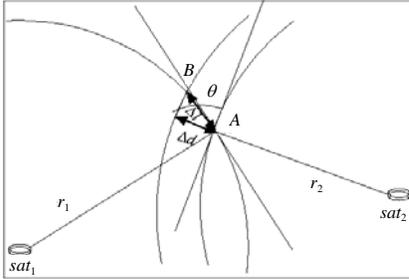


图1 卫星和用户间的几何关系

实际上是求以各个卫星为球心,以卫星到用户的距离为半径的各球面的交点。为了简化分析,不失一般性,设两颗卫星和用户所在的平面已经确定,如图1所示。图中,由于卫星以 sat_1 和 sat_2 为圆心,以卫星和用户间距离 r_1 和 r_2 为半径作圆,两个圆交于点A。现假设卫星 sat_2 和用户间的距离有误差 Δd ,则两圆交于点B,由此会产生定位误差 Δl 。根据GDOP的物理含义,要减小 G_{GDOP} 值, Δl 与 Δd 的比值应最小。在 $\Delta d \ll r_2$ 的情况下,有:

$$\frac{\Delta l}{\Delta d} = \frac{1}{\sin \theta} \quad (2)$$

式中 θ 是两个圆交点处切线的夹角。由式(2)可知,使 Δl 与 Δd 的比值最小的充要条件是 $\sin \theta$ 取得最大值,即 $\theta=90^\circ$ 。在静止卫星对称分布在东经 105° 两边的前提下,在我国中部的北纬 30° 线上,从东经 60° 到 150° 等间隔取10个点作为用户所在点,当它们与静止卫星的夹角 θ 的平均值为 90° 时,求得静止卫星的经度差为 80.3° 。在这个经度差下,两颗静止星恰好能保证对我国的双重覆盖。所以星座中选用两颗静止卫星,它们的地理经度为东经 65° 和东经 145° 。

4 同步椭圆轨道的参数选择

为了保证我国东西部取得同样的定位效果,可以将同步椭圆轨道卫星分为东西两组,每组卫星有相同的星下点轨迹。要使卫星具有相同的星下点轨迹的必要条件是卫星的升交点必须具有相同的地理经度,式(3)给出了升交点赤经和升交点地理经度的关系为:

$$r_{\text{raan}} = \lambda + \Delta\Omega + \frac{\Delta M}{T_e} T_s \quad (3)$$

式中 r_{raan} 是升交点赤经; λ 是升交点的地理经度; $\Delta\Omega$ 是初始时刻卫星在天球坐标系和地球坐标系的经度差; ΔM 是初始时刻升交点处平近点角和卫星平近点角的差值; T_e 是地球自转周期; T_s 是卫星的运行周期。平近点角可由开普勒方程^[4]和真近点角求得:

$$M = E - e \sin E$$

$$\tan f/2 = \sqrt{(1+e)/(1-e)} \tan E/2 \quad (4)$$

式中 M 是平近点角; E 是偏近点角; f 是真近点角; e 是偏心率。由式(3)和式(4)就可求得在给定的升交点地理经度下的升交点赤经。

同步椭圆轨道的参数中,有一些是对定位性能影响不大或可由其他因素确定的,可以先确定这些参数,以便简化优化过程。对于椭圆同步轨道,半长轴必须为 $42\,164\text{ km}$,倾角必须为 63.4° ,以防止拱点漂移。偏心率的大小直接影响卫星在北半球停留的时间和远地点的高度。偏心率越大卫星在北半球停留的时间越长,星座对我国及周边地区的定位性能也会越好。但偏心率较大造成卫星在远地点高度较高,从而要求卫星具有更大的发射功率。本文取一个折中的值0.3。为了保证卫星分布均匀,在同一组卫星中星间的平近点角

之差应为 $360^\circ/n$, n 为每组所含卫星数。仿照walker星座, 两组卫星的第一颗卫星之间的平近点角之差定为 $360^\circ/(2n)$ 。

卫星轨道的半长轴、倾角、偏心率、平近点角都已确定, 升交点赤经和近地点幅角 $\Delta\lambda$ 可通过仿真来确定。为了保证我国东部和西部获得相同的定位效果, 东西两组卫星应对称分布于东经 105° 两边, 每组包括3颗卫星。设 $\Delta\lambda$ 代表东边一组卫星的升交点与西边一组卫星的降交点的地理经度的差值, 设东边一组卫星的近地点幅角为 $270^\circ+\alpha$, 西边一组卫星的近地点幅角为 $270^\circ-\alpha$, 这样可以保证两组卫星对称分布并形成斜的8字形星下点轨迹。以我国的西安、哈尔滨、乌鲁木齐、台北、昆明、海口6个地点作为观测取样点, 改变 $\Delta\lambda$ 和 α , 取这6个点的GDOP均值最小时所对应的 $\Delta\lambda$ 和 α , 可确定卫星的升交点赤经和近地点幅角。

5 仿真结果分析

图2为GDOP的等高线图。该图是在采用四星定位的情况下计算得到的。由仿真结果求得当 α 为 36° , $\Delta\lambda$ 为 102° 时, GDOP的均值最小。此时东西两组卫星的近地点幅角分别为 206° 和 234° , 升交点的地理经度分别为 160° 和 109.9° 。表1列出了同步椭圆轨道卫星的参数, 其中, a 为半长轴; e 为偏心率; i 为轨道倾角; Ω 为升交点地理经度; ω 为近地点幅角; m 为平近点角。

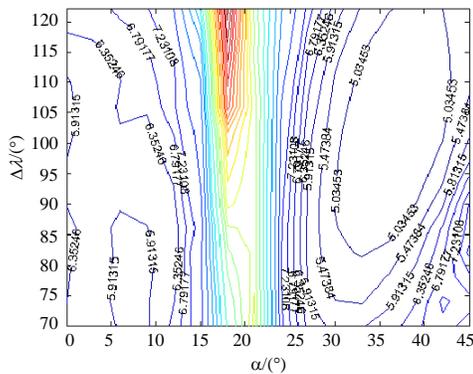


图2 GDOP等高线图

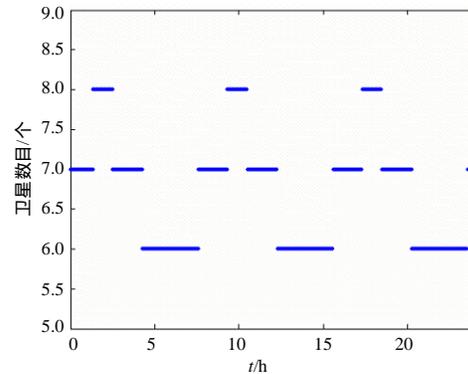


图3 卫星在西安的可见性

图3显示了位于西安的用户一天中可见卫星的数目, 仰角设定为 10° 以上。从图中可以看出, 卫星数目都在6颗以上。因此, 用户可以采用六星定位以提高定位精度。

表2、3分别列出了采用四星定位和六星定位时六个城市的GDOP的均值、方差、最大值和最小值。从表中看出, 高纬度地区的定位效果稍差于低纬度地区, 但差距并不明显。而采用六星定位时定位性能有明显改善, 不仅GDOP均值减小, 而且方差也大幅度减小。

表4反映了GPS系统采用四星定位时GDOP的情况。对比表3和表4可知, 采用六星定位时GDOP值和GPS采用四星定位时的GDOP值相差不大, 而且最大GDOP值更小。

图4反映了位于西安的用户一天中GDOP的变化情况。从图中可以看出, 采用六星定位时的GDOP值明显低于四星定位时的GDOP值, 并与GPS接近。

表1 同步椭圆轨道卫星参数

卫星	a/km	e	$i/(\text{°})$	$\Omega/(\text{°})$	$\omega/(\text{°})$	$m/(\text{°})$
1	42 164	0.3	63.4	160	206	0
2	42 164	0.3	63.4	160	206	120
3	42 164	0.3	63.4	160	206	240
4	42 164	0.3	63.4	109.9	234	60
5	42 164	0.3	63.4	109.9	236	180
6	42 164	0.3	63.4	109.9	234	300

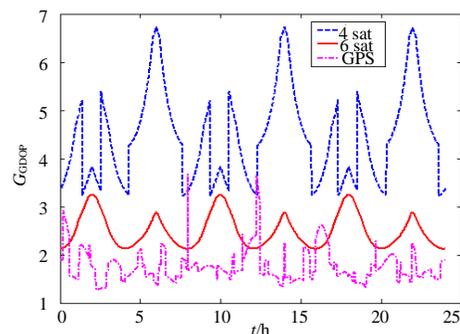


图4 西安一天中的GDOP值

表2 采用四星定位的GDOP特性

	西安	哈尔滨	乌鲁木齐	台北	昆明	海口
GDOP均值	4.468 2	4.845 4	4.766 6	4.284 0	4.166 8	3.995 2
GDOP最大值	6.726 1	6.895 4	6.851 2	6.788 1	6.723 2	6.746 8
GDOP最小值	3.229 5	3.278 5	3.238 3	2.737 9	3.151 2	2.922 4
GDOP 方差	0.895 7	0.643 0	0.700 7	1.287 1	1.098 1	1.171 9

表3 采用六星定位的GDOP特性

	西安	哈尔滨	乌鲁木齐	台北	昆明	海口
GDOP均值	2.511 2	2.594 6	2.577 6	2.512 1	2.488 7	2.484 4
GDOP最大值	3.243 4	3.356 2	3.330 3	3.279 2	3.233 7	3.244 3
GDOP最小值	2.123 1	2.166 4	2.154 0	2.097 4	2.100 1	2.092 0
GDOP 方差	0.130 8	0.143 5	0.140 6	0.137 2	0.131 3	0.133 7

表4 GPS的GDOP的特性

	西安	哈尔滨	乌鲁木齐	台北	昆明	海口
GDOP均值	1.774 8	1.734 8	1.791 0	1.740 1	1.757 3	1.688 5
GDOP最大值	3.398 0	3.261 0	4.825 0	3.005 0	3.618 0	2.767 0
GDOP最小值	1.276 0	1.234 0	1.264 0	1.262 0	1.268 0	1.321 0
GDOP 方差	0.132 5	0.195 1	0.224 1	0.120 6	0.176 2	0.071 4

6 结束语

本文分析并选择了构造区域卫星定位系统应采用的轨道类型,提出了优化方案并仿真得到了卫星星座参数。通过对GDOP的计算表明,该星座能够满足我国的卫星定位需求。当采用六星定位时,其GDOP特性接近采用四星定位的GPS系统。因此,利用较少卫星建造区域卫星定位系统是完全可行的。

参 考 文 献

- [1] Sharpe L. Galileo on the move[J]. IEE Review, 2001, 47(2): 10-11.
- [2] Sukegawa S. Air traffic implementation in the Asia-Pacific region[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 1997, 12(3): 33-37.
- [3] 刘会杰, 张乃通. 基于GDOP的最优定位星座性能研究[J]. 高技术通信, 2001, 1: 43-47.
- [4] 刘 林. 地球卫星轨道力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.

编 辑 漆 蓉