

一种新的卫星导航系统快速选星方法

陈灿辉, 张晓林

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 从几何精度因子(GDOP)与星座几何布局的关系出发, 提出了用于多星座卫星导航系统的快速选星方法——几何布局选星法. 该方法以满足定位要求为前提, 按卫星在星座中均布为原则来进行选星. 仿真结果表明, 相对传统 GDOP 选星法, 计算量减少 99% 以上, 而 GDOP 满足要求, 同时, 选星数较少且简洁快速, 有效满足了选星求解的实时性和精度要求.

关键词: 卫星导航系统; 选星; 几何布局; 几何精度因子; 仿真

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2887-05

A Fast Satellite Selection Approach for Satellite Navigation System

CHEN Can-hui, ZHANG Xiao-lin

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the analysis of relationship between the geometric dilution of precision (GDOP) and the geometry layout of constellation, a new fast satellite selection method, which is called geometry satellite selection approach (GSSA), is proposed for multi-constellation satellite navigation system. The operation of satellite selection of the proposed method is operated on the premise that the positioning requirement must be met and on the principle of uniform distribution of satellites. Simulation results show that the decrease in computation load of GSSA is more than 99% in contrast with the traditional optimal GDOP method, and the constellation GDOP obtained by GSSA can meet the demand of navigation and positioning. At the same time, the number of selecting satellites also is little, and the satellite selection is simple and rapid. And it is satisfied to the real-time capability and accuracy demand of satellite selection of satellite navigation system.

Key words: satellite navigation system; satellite selection; geometry layout; geometric dilution of precision (GDOP); simulation

1 引言

目前, 世界上已经存在的两大全球卫星导航系统是美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS, 欧盟的伽利略 (GALILEO) 系统和中国的北斗二代系统 (Bei Dou/Compass Navigation Satellite system, 简称为 COMPASS) 等正在积极筹建. 不久的将来, 这些系统将共同组成全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, 简称为 GNSS). 到那时, 全球导航卫星将有一百多颗, 多卫星导航系统的组合导航势成必然. 采用多星座卫星导航系统时, 可见星将大幅增加, 定位精度和系统可用性及可靠性均将大大提高, 但同时, 导航定位的运算量也随之成倍增长, 加之工程上对用户接收机的处理器速度要求提高, 特别是对高动态用户而言, 为了保证实时处理的要求, 对接收机处理器速度的要求就更是大大提高, 因而大大加重了接收机的负担,

使其成本上升. 而实际上, 不可能也不需要采用所有可见星来进行导航定位, 只需要选出满足定位精度要求的少数卫星进行导航定位即可. 因此, 在多星座卫星导航定位系统中, 选星便显得迫切而重要.

在卫星导航定位系统中, 影响定位精度的关键因素之一是几何精度因子 (Geometric Dilution Of Precision, 简称为 GDOP). 传统选星方法主要针对 GDOP, 有 GDOP 或加权 GDOP 选星. GDOP 或加权 GDOP 越小, 定位精度越高. 传统选星方法虽然能找出在规定选星数目下具有最小 GDOP 的卫星组合, 但计算量大, 实时性差, 特别是对于多星座卫星导航系统而言, 它几乎不可能做到实时选星. 因此, 多星座卫星选择问题就成了卫星导航系统研究中的一个难点.

目前, 针对卫星导航系统选星问题, 出现了一系列为减少计算量而设计的方法^[1~4], 它们或是针对单星座

选星来设计,或是在可见星较多时计算量仍较大,或是最终选取的卫星数较多,这使得它们在多星座组合导航定位中进行动态实时选星时存在不足.本文从星座几何布局与 GDOP 的关系出发,提出了一种新的、实时性和计算结果都较好的快速选星方法.

2 星座几何布局与 GDOP

我们知道,对于由 s 个星座组成的系统而言,为了满足定位求解的需要,至少要选取 $n(=3+s)$ 颗可见星.而为了进行故障检测,至少需要选取 $n+1$ 颗卫星,而为了排除故障,至少需要选取 $n+2$ 颗可见星.

星座几何精度因子 GDOP 的计算式为^[5]:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{tr}[(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}]} \quad (1)$$

其中, \mathbf{H} 为设计矩阵,为 $m \times n$ 维的, m 表示可见卫星数, tr 表示求矩阵之迹.

卫星导航系统的精度一般可以表示为^[5,6]:

$$\sigma_p = \text{GDOP} \cdot \sigma_{\text{UERE}} \quad (2)$$

式中, σ_p 是定位精度的标准偏差,而 σ_{UERE} 是用户等效距离误差的标准偏差.

由此可见, GDOP 值越小定位精度越高.因此,在定位求解时要尽量选取 GDOP 较小的卫星组合.在单星座系统情形下 4 颗可见星时, GDOP 可表示为^[7]:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{tr}[(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}]} = \frac{\sqrt{\text{tr}[(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^*]}}{\|\mathbf{H}\|} = \frac{A}{6V} \quad (3)$$

其中 $A = \sqrt{\text{tr}[(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^*]}$, V 表示由卫星到用户的单位矢量的端点所围成的四面体的体积.采用更多卫星定位的情况与此类似,只是公式较为复杂.由式(3)可得 V 和 GDOP 的关系,如图 1 所示.

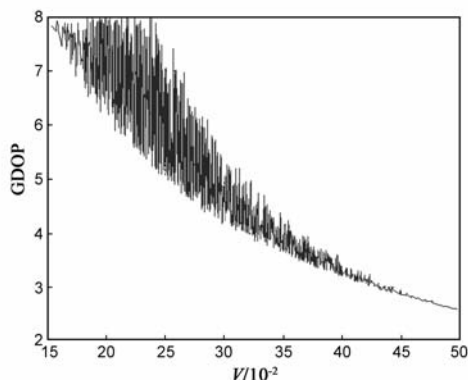


图1 GDOP值与体积 V 的关系

由图 1 可见,随着 V 的增大,在总体趋势上 GDOP 是减小的.特别是当 V 增大到一定程度后,这种关系近似是单调的,因此,可认为当 V 达到最大时 GDOP 最小.对于单系统四颗卫星情形,由于正四面体的体积最大,可知一颗卫星在用户头顶,另外三颗星在用户与地面相切平面上的投影互隔 120° ,卫星仰角等于接收机遮蔽

角,此时所得星座是最佳的.对于多星情形,同样,当一颗卫星在用户头顶,其它卫星在星空视图中均匀分布时所获得的星座也应当是较优的.当然,还必须考虑到,卫星仰角越小,其传输误差越大,从而其对应的距离误差会增大.由式(2)可知,定位精度除与精度因子有关外,还与测距误差有关,因此,在选星中,我们不能只选取那些仰角与遮蔽角近似的卫星,而应均衡考虑精度因子与测距误差两方面的因素.基于此,我们就提出了一种以仰角分区为前提、以卫星在星空视图中均匀分布为原则的次优快速选星法,称之为“几何布局选星法”.

3 几何布局选星法

在卫星导航系统中,总是希望选择 GDOP 最优的卫星星座.但以最优 GDOP 为原则进行选星时,因其计算量太大,不能满足实时性要求.特别是在多星座组合导航情形下,可见卫星数 N 很大,如果以最优 GDOP 为原则从中选择 m 颗卫星,则需进行 C_N^m 次 GDOP 求解,其计算量是巨大的,从而占用时间会很长,对实时用户而言,这是无法承受的.

我们提出的“几何布局选星法”,是一种新的卫星导航系统快速选星方法,它以卫星仰角大小分区为前提、以卫星在星空视图中均匀分布为原则,以 GDOP 为衡量基准进行选星.与传统选星方法不同的是,这里不以追求最优 GDOP 为目标,而是将 GDOP 作为设计要求设定其限制值,只要选择的星座 GDOP 值不超出该限制值,就认为选择的星座满足导航定位要求,可以使用该星座进行导航定位;同时,为了有效减少过多冗余信息并在定位精度和导航运算量之间进行均衡处理,在该方法中,我们还将最大选星数作为限制要求.具体来说,它是通过以下步骤实现的.

步骤一:配置参数.

根据定位需要和接收机性能以及组合星座个数,配置所需选取定位卫星的最大数目和星座 GDOP 值的限制要求即门限值,此外,考虑到低仰角卫星测距误差较大,为了剔除较低仰角卫星,还应根据应用环境设置遮蔽角的限制值 θ_{MA} .对于最大选星数,应当以接收机的总通道数为前提、并考虑定位解算和故障监测的需要及运算量大小进行综合确定,例如,对双系统星座,可取为不大于 9.而 GDOP 的门限则取决于使用环境下对定位精度要求的严格程度,通常,选择 GDOP 的门限为 6^[5].

步骤二:根据卫星历书或星历获取可见星位置.

步骤三:获取可见星仰角 θ_{EL} 和方位角 θ_{AZ} ,并剔除仰角小于遮蔽角 θ_{MA} 的卫星.

步骤四:对可见星按仰角分区并选择仰角最大的

卫星作为选星结果的第一颗星 S_1 .

按仰角划分的三个区域分别是: $90^\circ \sim 75^\circ$ 、 $75^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim \theta_{MA}$, 分别称为高、中、低仰角区, 各区域中的可见卫星数依次记为 K_H 、 K_M 、 K_L .

步骤五: 根据 K_H 及卫星 S_1 的仰角大小判断是否增选高仰角卫星.

如果卫星 S_1 的仰角不小于 80° 或 K_H 数量不足, 不进行增选; 否则, 在高仰角卫星区域中选择一颗与卫星 S_1 方位角相差最大者作为 2 号星.

步骤六: 分别在中、低仰角卫星区域中选星.

首先, 根据组合卫星系统数, 配置需要从中、低仰角卫星区域中选取的卫星数 K_{SOM} 和 K_{SOL} . 确定 K_{SOM} 和 K_{SOL} 的基本原则是: 在最大选星数限制下尽量进行均匀配置, 并保证总选星数能满足故障检测与排除的需要. 例如, 对单、双系统, 可取 $K_{SOM} = K_{SOL} = 3$, 这样, 总选星数至少为 7, 能满足故障检测与排除的要求.

然后, 对中仰角星和低仰角星按方位角大小进行排序.

最后, 根据每个区域中的卫星数, 按方位角等距的原则, 按所在区域所配置的选星数分别在中、低仰角区域选取适当数量卫星, 需要注意的是, 所选卫星数不计卫星 S_1 .

步骤七: 求解 GDOP.

步骤八: 判断 GDOP 大小并确定是否增选或改选卫星.

如果 GDOP 满足限制要求, 则所选卫星即作为定位卫星, 从而完成选星过程.

如果 GDOP 不满足要求, 则在最大选星数的限制下, 在中仰角和低仰角卫星区域中进行增选或改选. 这里, 以选取方位角与已选卫星方位角相差最大的原则进行增选. 改选的原则是: 以剔除两两之间方位角之差最小的一颗卫星为前提, 重新选取一颗与已选所有卫星方位角都相差在一定角度(如 30°)以上的卫星. 在增选或改选后, 重复步骤七、八, 直至 GDOP 满足设计要求, 即完成选星过程.

根据以上步骤, 形成几何布局选星法的结构流程如图 2 所示.

4 几何布局选星法性能分析

对于一个选星方法, 可以从方法的有效性、星座 GDOP、选星运算量以及对后续导航定位运算的影响等方面来衡量其性能.

(1) 方法的有效性

几何布局选星法是以星座几何布局与 GDOP 关系为依据, 综合考虑影响定位精度的两个因子——GDOP 和测距误差进行设计的, 算法目标明确, 流程简洁. 统计分析表明, 该方法能在不超过 3 次 GDOP 求解的情形下、以不小于 0.98 的概率获得 $GDOP \leq 6$ 的要求.

(2) GDOP 值

几何布局选星法是以 GDOP 限制要求为前提来进行选星的, 最终所选星座的 GDOP 值虽然不是最优的, 但却满足导航定位的需要, 是满足要求的解.

(3) 选星运算量

传统选星方法是按需要选取的 m 颗卫星对所有 N 颗可见星进行组合计算, 然后找出最佳星座, 所以共需计算 C_m^N 次 GDOP. 例如, 对于具有 20 颗可见星的双星座系统, 即使是选择最低要求的 5 颗卫星, 也要进行 15504 次 GDOP 求解, 而如果考虑故障检测与排除的需要, 则至少应选取 7 颗卫星, 此时需进行 77520 次 GDOP 求解, 其计算量是巨大的, 对实时用户而言, 这是无法承受的. 而新方法对 GDOP 只是进行校核计算, 计算次数很少, 经验证, 在 GDOP 限制要求为 6 时, 98% 以上的选星时刻只需不超过三次 GDOP 求解, 而所获得的 GDOP 均能满足导航定位要求. 从总选星计算量来看, 几何布局选星法不到传统 GDOP 选星法的 1%, 这也就为本文所述方法在动态条件下的实时选星提供了保证.

(4) 对后续导航定位运算的影响

几何布局选星法最终选择的卫星数较少, 例如, 双系统最多 9 颗即可, 而每增加 1 个系统也只需增加 1 颗卫星, 大大降低了导航定位的运算量. 同时, 对双系统、三系统和四系统, 其选择的最少卫星数分别为 7、8、9, 而对单系统, 在卫星数足够多的情形下, 我们也主张以选取 7、8 颗卫星为宜, 这也就满足了接收机自主完好性

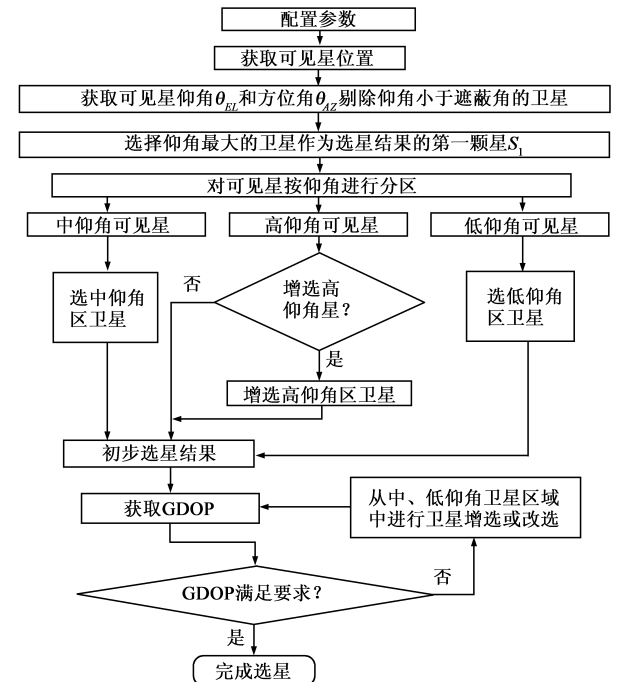


图2 几何布局选星法流程图

监测和故障识别的需要。

(5) 与其它几何选星方法的比较

其它常用的几何优化选星法,主要是以选取满足定位要求的最少卫星数为前提进行的,其结果也同样是次优解,其计算量与可见卫星数成正比,例如,在双星座系统具有 20 颗可见星的情形,其 GDOP 求解量约为 90 次,但因其选星数仅考虑了定位求解的需要,其选星结果不满足完好性监测要求。而几何布局选星法求解 GDOP 的次数更少,且选星数兼顾了定位解算和接收机完好性监测的需要,具有更为广泛的适用性。

5 仿真分析

5.1 仿真环境

考虑到北斗二代卫星导航系统开通在即, GPS 是目前最为完善的卫星导航定位系统,而双系统联合定位又具有一定的普遍性,故这里以 GPS 和 COMPASS 组成的双系统进行分析。

根据北斗二代一期组网计划,对 COMPASS 按 12 颗星进行考虑。GPS 系统基本星座为 24 颗星,实际上,1995 年以来, GPS 在轨的有效卫星数一直超过 24 颗^[6]。为了更好的评价选星方法在较多可见星情形下的性能,在星座配置时, GPS 取 32 颗星。

5.2 选星求解仿真与分析

根据星座仿真所获得的 GPS 和 COMPASS 卫星位置,以中国地壳运动观测网络的 27 个基准站为参考,采用几何布局选星法,对由 GPS 与 COMPASS 组成的双星座卫星导航系统在全中国范围内的选星问题进行了仿真分析,仿真时长为 24 小时,选星间隔为 5s,总共进行了 466587 个时空点的仿真。仿真结果如图 3~6 所示。

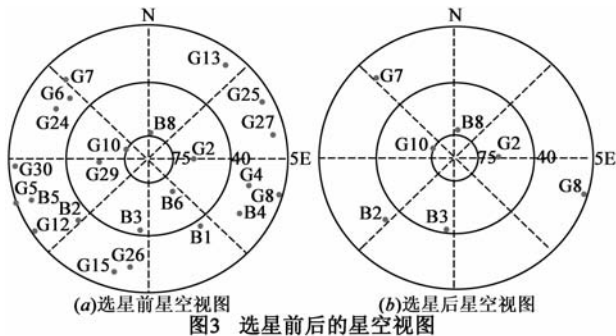


图3 选星前后的星空视图

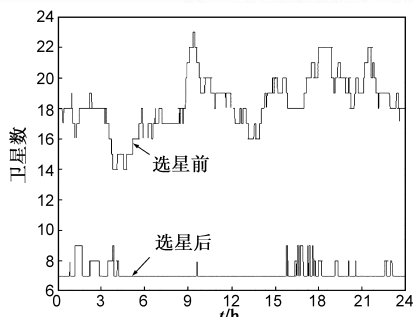


图4 选星前后卫星数对比图

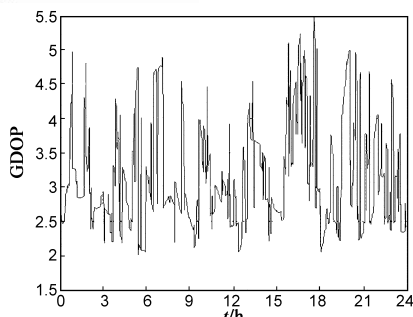


图5 各选星时刻选星后的GDOP曲线

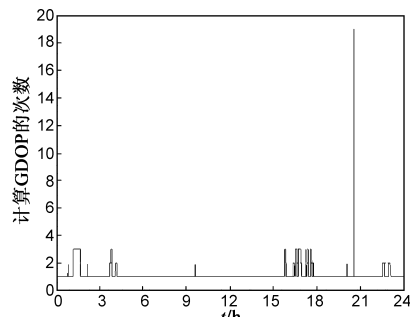


图6 各选星时刻选星过程中计算GDOP的次数

图 3 为北京十三陵地区(BJSH 站)世界协调时 9:30 时选星前后星空视图对比图。图中,“G”、“B”分别表示 GPS 卫星和 COMPASS 卫星,其后数字表示卫星号。由图 3 可见,选星前,可见卫星数较多(23 颗),分布上存在“扎堆”现象;选星后,可见星散布较好,卫星数较少(7 颗),其 GDOP 为 2.35,满足设计要求。图 4 为 BJSH 站选星前后卫星数对比图。由图 4 可见,选星后用于定位的卫星数远远少于选星前的可见卫星数,这将大大降低接收机导航处理负担,有利于导航接收机快速实时定位;同时,卫星数也满足故障检测与排除要求。图 5 示出了选星后的 GDOP 曲线,可见,选星后,各时刻 GDOP 值较小,都在 5.5 以下。一般,卫星系统可用性的选择规定为位置精度因子 $PDOP \leq 6$ ^[5]。因为选星后有 $GDOP \leq 5.5$,而 $PDOP < GDOP$,从而,采用几何布局选星法所获得的结果是能满足导航定位要求的。虽然这是一个站点的求解结果,而事实上,从 27 个站点统计结果来看,各站点仿真结果基本类似,对双系统而言,选择的卫星数为 7~9,获得的星座 GDOP 能满足规定的门限要求。

图 6 为 BJSH 站各选星时刻采用几何布局选星法进行选星求解时 GDOP 计算次数,可见,几何布局选星法的选星过程只需进行少数几次 GDOP 求解。对 27 个站点统计可知,一天内 98% 以上的时刻在选星过程中求解 GDOP 的次数不超过三次,而计算 GDOP 的最大次数一般也不会超过总可见卫星数。这就表明本文所提出的几何布局选星法能达到实时快速选星的目的。

为了与传统选星法进行比较,本文还对最优 GDOP 选星法进行了仿真。仿真结果表明,从星座 GDOP 来看,约有 27.1% 的选星时刻几何布局选星法优于最优 GDOP 选星法;而从计算量来看,最优 GDOP 选星法远远大于几何布局选星法,并且,最优 GDOP 选星法一般只是选取满足基本定位要求的卫星数,这就不满足接收机自主完好性监测需要,而如果要选取更多卫星,其选星计算量就会成倍增加,这就很难进行实时求解。而本文所述几何布局选星法计算量不到最优 GDOP 选星法的 1%,所选卫星数能满足接收机自主完好性监测要求,所获得的星座 GDOP 也能满足导航定位的需要,是一种可进行实时求解的选星方法。

6 结论

本文以获得满足设计要求的 GDOP 而非最优 GDOP 为前提,从卫星导航系统星座几何布局的角度出发,以卫星均布为原则,提出了一种新的快速选星方法——几何布局选星法,详细讨论了其具体实施步骤,给出了设计流程,探讨了实际运行中的相关参数配置原则。仿真结果表明,该方法克服了传统选星方法计算量大的缺点,相对传统最优 GDOP 选星法而言,计算量的减少量超过 99%;同时,选择的卫星数也较少,而所获得的星座 GDOP 值满足导航定位要求,可以实现简单、快速选星,能有效用于多星座卫星导航系统中的实时选星求解。

参考文献:

- [1] 张贵明,黄顺吉,等.一种新的 GPS 导航卫星选择算法[J].电子科技大学学报,2000,29(3):221-224.
Zhang Guiming, Huang Shunji, et al. A new satellite selection algorithm for GPS navigation[J]. Journal of UEST of China, 2000, 29(3): 221-224. (in Chinese)
- [2] 李敏,刘小汇,等.新的 GPS 自适应阵的选星方法[J].通信学报,2007,28(6):127-132.
Li Min, Liu Xiao-hui, et al. Novel satellite selection methods for GPS adaptive arrays[J]. Journal on Communication, 2007, 28(6): 127-132. (in Chinese)
- [3] 张强,张晓林,等.组合卫星接收机中的选星算法[J].北京航空航天大学学报,2007,33(12):1424-1427.
Zhang Qiang, Zhang Xiaolin, et al. Satellite selection algorithm for combined satellite receivers[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(12): 1424-1427. (in Chinese)
- [4] 金玲,黄智刚,等.多卫导组合系统的快速选星算法研究[J].电子学报,2009,37(9):1931-1936.
Jin Ling, Huang Zhi-gang, et al. Study on fast satellite selection algorithm for integrated navigation[J]. Acta Electronica Sinica,

2009, 37(9): 1931-1936. (in Chinese)

- [5] Elliott D Kaplan, Christopher J Hegarty. GPS 原理与应用(第二版)[M]. 寇艳红,译.北京:电子工业出版社,2007. 240-268.
Elliott D Kaplan, Christopher J Hegarty. Understanding GPS: Principles and Applications(Second Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. 240-268. (in Chinese)
- [6] Pratap Misra, Per Enge. 全球定位系统——信号、测量与性能(第二版)[M]. 罗鸣,等,译.北京:电子工业出版社,2008. 22-168.
Pratap Misra, Per Enge. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance, Second Edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 22-168. (in Chinese)
- [7] 丛丽, Ahmed I Abidat, 等. 卫星导航几何因子的分析和仿真[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2204-2208.
Cong Li, Ahmed I Abidat, et al. Analysis and simulation of the GDOP of satellite navigation [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2204-2208. (in Chinese)

作者简介:



陈灿辉 男,1973 年 9 月生于湖南省汨罗市.现为北京航空航天大学通信与信息系统博士研究生.主要从事卫星导航研究.
E-mail: canhuich@yahoo.com.cn

张晓林 男,1951 年 1 月生于北京市.北京航空航天大学教授、博士生导师,国家卫星导航应用工程研究中心副主任、教育部国家集成电路人才培养基地负责人.主要研究方向为集成电路设计、飞行器遥测遥控与卫星导航系统.
E-mail: zxl2007@vip.sina.com