

适用于我国的中轨 TDRSS 星座方案研究

吴廷勇 朱立东 吴诗其

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘要 基于中轨跟踪与数据中继卫星系统(MEO-TDRSS)星座方案的功能和业务特性,对4种常见星座实现的我国中轨 TDRSS 的覆盖特性和星际链路性能进行了仿真分析和比较。仿真结果表明,我国的中轨 TDRSS 宜采用具备卫星全球均匀分布特性的玫瑰星座和共地面轨迹星座。

关键词 星座,中轨,跟踪与数据中继卫星系统,星际链路

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)05-0865-06

The Satellite Constellation Scheme Study for MEO-TDRSS of China

Wu Ting-yong Zhu Li-dong Wu Shi-qi

(The National Key Lab. of Communication, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Based on the functionality and traffic characteristics of the Medium Earth Orbit Tracking and Data Relay Satellite System(MEO-TDRSS), the coverage properties and Inter-Satellite Link(ISL) performances of four familiar satellite constellation schemes which are adopted as the MEO-TDRSS of China are simulated and compared. The simulation results indicate that Rosette and Common-track constellations, whose satellites are distributed in the celestial sphere uniformly, are appropriate for MEO-TDRSS of China.

Key words Satellite constellation, MEO, TDRSS, ISL

1 引言

跟踪与数据中继卫星系统(Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS)是用于转发地面站对低轨道航天器的跟踪/遥测信息和将航天器获取的数据实时中继传输回境内地面站的专用卫星系统,广泛应用于国防和航天通信领域。目前,国际上的TDRSS大都采用静止轨道(GEO)卫星,如美国的跟踪与数据中继卫星系统TDRSS^[1,2]和俄罗斯的卫星数据与中继网络SDRN(Satellite Data and Relay Network)^[3],利用3颗或更多的GEO卫星实现对全球低空空域的准连续覆盖。由于GEO轨位获取的限制(我国很难获得位于西半球的静止卫星轨位),如果我国也采用GEO卫星构建TDRSS,该系统将无法连续覆盖全球低空空域,在西半球存在覆盖盲区。如果采用具有星际链路的中轨圆轨道卫星星座来实现我国的中轨TDRS系统,则可以避免采用GEO卫星系统时的轨位限制,能够实现对全球低空空域的实时连续覆盖,是符合我国国情的、可行的系统方案。

由于中轨 TDRSS 的用户是分布于全球低空空域的各种航天器,因此系统必须拥有连续覆盖全球低空空域的能力;再者,根据 TDRSS 的结构和功能特性,可知其业务量分布具备如下特征:低轨航天器到中轨中继星的用户星际链路的

数据量相对较小,数据传输速率较低;每颗中轨中继星要服务若干用户,因此中继星之间的中轨中继星际链路必须具有较大的容量,支持较高的数据传输速率;所有的中继数据经由1或2颗中轨中继卫星下传到境内地面站,因此中轨中继卫星到地面站的下行链路必须具有非常高的数据传输速率。为了支持中继数据对地的高速传输,系统应当具有对我国的良好覆盖特性。综上可知,我国中轨 TDRSS 的覆盖特性包含对全球低空空域的覆盖特性和对我国的区域地面覆盖特性。另外,对于具备系统内星际链路的星座系统,星际链路实现的难易程度直接关系到系统的可实现性,也是在研究系统星座方案时必须考虑的问题。

目前,常见的非静止轨道卫星星座的主要类型有玫瑰(Rosette)星座、优化极轨道星座、赤道轨道星座和共地面轨迹星座等4种。这些星座在覆盖特性和星际链路特性都存在一定的差别,因此,我国的中轨 TDRSS 应当采用何种形式的星座才能获得最佳的性能,是非常值得研究的问题。

本文对上述4种星座在实现我国中轨 TDRSS 时的覆盖特性和星际链路特性进行了分析和比较,根据仿真分析的结果确定了适合于我国的 TDRSS 采用的星座类型。本文第2节简介了4种类型星座的特点,给出4个用于性能仿真比较的中轨 TDRSS 星座方案实例;第3节是4种中轨中继星座的覆盖特性和星际链路特性的仿真分析和比较;第4节是结束语。

2 卫星星座类型和实例

2.1 卫星星座类型简介

玫瑰(Rosette)星座和优化极轨道星座主要用于设计全球性覆盖的星座,而赤道轨道星座和共地面轨迹星座则主要用于设计区域性覆盖的星座。

玫瑰星座最早由Ballard提出并命名,是一种倾斜圆轨道星座,主要用于设计全球性覆盖的星座系统,其设计性能与Walker星座相当^[4]。玫瑰星座中,各轨道面相对于某一参考平面有相同的轨道倾角,各轨道面具有相同的轨道高度和卫星数量,各轨道的右旋升节点在参考平面内均匀分布,卫星的初始幅角与轨道面的右旋升节点成一定的比例关系。玫瑰星座的卫星在轨道空域面内具有较均匀的分布特性,能够提供较平均的对地覆盖特性,利于实现全球覆盖。玫瑰星座也可用于设计区域覆盖星座系统,但其性能通常不是最佳的。

优化极轨道(简称为极轨道)星座一般用于实现全球或者极冠地区的覆盖^[5,6]。优化极轨道星座设计时采用覆盖带组合的方法,对赤道区域能够保持连续覆盖,而在高纬度地区和极地地区能够提供多重覆盖。由于高纬度地区和极地地区的通信业务需求相对较少,系统资源在这部分区域得不到充分利用。

赤道轨道星座的卫星在赤道平面内均匀分布,能够实现中低纬度地区的连续覆盖,但不能提供对高纬度地区和极冠地区的覆盖。由于所有卫星处于同一轨道面内,因此系统的管理相对简单。

共地面轨迹(common track)星座是一类特殊的星座,通常

用于实现区域覆盖。星座采用多个轨道面、每个轨道面内一颗卫星的结构,利用地球的自转特性和合理设计的轨道面升节点差以及不同轨道面内卫星间的相位差,使得多颗卫星具有相同的地面轨迹,因而称为共地面轨迹星座^[7-9]。一般情况下,为维持地面轨迹的不变性,共地面轨迹星座通常采用回归轨道,利用良好的地面轨迹重复特性,实现对特定区域的连续覆盖。

2.2 星座方案实例

玫瑰星座、极轨道星座、赤道轨道星座和共地面轨迹星座从理论上均可用于实现我国的中轨 TDRSS,但由于各星座中卫星的分布和运行规律上存在差异,将导致不同星座类型的中轨 TDRSS 在性能上有一定的差别。表 1 和表 2 中给出了用于我国 TDRSS 的 4 种中轨星座方案的参数。

4 种星座方案都选用了 6 颗中轨卫星,采用高度 13892km 的回归轨道,在一天内围绕地球旋转 3 圈,所有星座均具备良好的周期重复特性。玫瑰星座的参数参照文献[4]中的最优 6 星玫瑰星座的参数,该组参数保证卫星在天球上具有最均匀的分布特性;极轨道星座的参数参照文献[5,6]中的最优 6 星极轨道星座的参数;共地面轨迹星座的参数参照文献[7]中的星座参数,该星座对我国及周边地区具有良好的统计覆盖特性。

3 星座方案的性能仿真分析

星座的覆盖特性是衡量系统总体性能的一个重要的指标,对我国的中轨中继卫星星座,如前所述,系统应对全球低空空域和我国地面区域实现连续覆盖。另外,中继卫星系

表 1 玫瑰、极轨道和赤道轨道星座参数

星座类型	玫瑰星座	极轨道星座	赤道轨道星座
轨道高度(km)	13892	13892	13892
轨道倾角(°)	53.1	90	0
卫星数量(颗)	6	6	6
轨道面数量(个)	6	2	1
轨道面升节点经度差(°)	60	104.49	0
相邻轨道面相邻卫星相位差(°)	240	60	0
轨道面内星际链路数量(条/星)	0	2	2
轨道面间星际链路数量(条/星)	2	2	0

表 2 中轨共地面轨迹星座参数

卫星代号	轨道高度(km)	轨道倾角(°)	升节点经度(°)	初始幅角(°)
卫星1号	13892	55	105	0
卫星2号	13892	55	142	249
卫星3号	13892	55	179	138
卫星4号	13892	55	216	27
卫星5号	13892	55	253	276
卫星6号	13892	55	290	165

统具备星际链路,因此其数据传输可以不依赖于地面通信网络,形成真正独立的空中传输网络。但是,由于中轨星座中卫星的轨道高度较高、数量较少,星际链路的实现难易程度如何,又成为影响系统可实现性的重要因素。本节给出了4个星座方案的覆盖特性和星际链路特性的仿真结果并进行了分析比较。

3.1 星座系统对全球低空空域的覆盖特性

中继卫星系统的主要功能是对低空空域内的各种航天器进行天基测控和提供数据中继链路。由于我国的低轨航天器可以位于全球低空空域面上的任何位置,因此中继星座系统对低空空域的覆盖特性实际上包括两个方面:(1)中继星座应具备连续覆盖全球低空空域的能力;(2)中继星座应对整个低空空域有较平均的覆盖性能,以保证低空航天器在任何位置都能够获得几乎相同的服务性能。星座对全球低空空域连续覆盖能力可以通过对空域的统计覆盖率来表征,对全球低空空域覆盖的均匀性采用低空空域的纬度平均接入距离特性和平均接入距离的分布特性来进行表征。我们将低空空域面上的点与星座中距离最近的卫星之间的距离称为该点对星座的瞬时接入距离;将低空空域面上某一点在一个恒星日内对星座的瞬时接入距离的时间平均称为该点的平均接入距离;将某一纬度上所有点的平均接入距离的统计平均称为纬度平均接入距离;将空域面上所有点的平均接入距离的统计平均称为全球平均接入距离。4个星座方案对不同高度低空空域的统计覆盖特性如图1所示;对300km空域面的纬度平均接入距离特性如图2所示;对300km空域面的接入距离的概率分布特性如图3,对300km空域面的全球平均接入距离如表3。

由图1可以看出:玫瑰星座、极轨道星座和共地面轨迹星座对低空空域的整体覆盖特性接近,它们对50km以上空域均能实现连续覆盖;由于赤道轨道星座中卫星始终处于赤

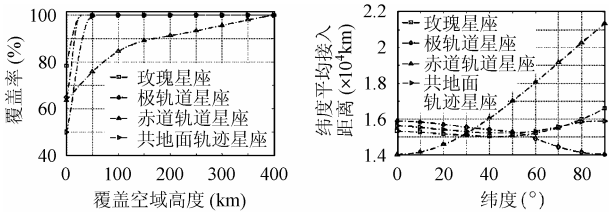


图1 星座对低空空域的覆盖率

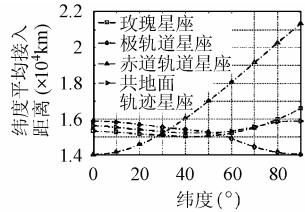


图2 星座对300km空域的纬度平均接入距离

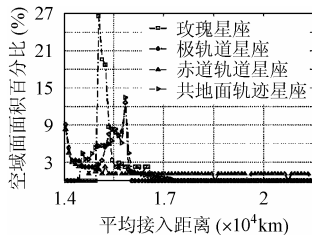


图3 星座对300km空域接入距离的概率分布

表3 星座对300km空域面的全球平均接入距离

星座类型	全球平均接入距离(km)
玫瑰星座	15372
极轨道星座	15134
赤道轨道星座	16923
共地面轨迹星座	15469

道上,因此对两极空域的覆盖特性较差,系统只能连续覆盖400km以上空域。

图2表明:共地面轨迹星座的纬度平均接入距离的动态变化范围最小,对不同纬度的覆盖最均匀;玫瑰星座的纬度平均接入距离的动态变化范围略大,覆盖也较均匀;赤道轨道星座的纬度平均接入距离在低纬度地区小而高纬度地区大,极轨道星座的纬度平均接入距离在低纬度地区大而高纬度地区小,这与两种星座中卫星的分布特性相符。

图3给出了300km空域面上的点对星座的接入距离的概率分布特性。可见,空域面上的点对玫瑰星座和极轨道星座的接入距离的动态范围最小,接入距离的取值分别集中在15000-17000km和14000-16000km之间;对共地面轨迹星座的接入距离的动态范围略大,取值主要集中在14000-17000km之间;对赤道轨道星座的接入距离的动态范围最大,接入距离在整个取值变化范围内分布较均匀。再根据表3中给出的各星座方案的全球平均接入距离,可以看出玫瑰星座、极轨道星座和共地面轨迹星座对空域覆盖的均匀性相差无几,而赤道轨道星座的均匀性则是较差的。

综合以上分析,在对低空空域的覆盖特性上,玫瑰星座、极轨道星座和共地面轨迹星座的总体性能相当,赤道轨道星座的较差。

3.2 星座系统对我国地面区域的覆盖特性

由于通过我国中轨TDRSS中继的数据会集中在少数(1或2颗)卫星下传至地面站,因此该下传链路应具备非常高的传输速率以避免系统出现瓶颈,影响系统的整体性能。这就对星座系统对地面站的覆盖特性提出了较高的要求。本文从比较星座的覆盖特性出发,在已经选定地面站情况下,以星座对地面站的最大仰角作为性能指标,比较各类型星座对地面站的覆盖特性。仿真时在我国境内选取了9个地面站,分别位于北京、武汉、福州、海口、拉萨、喀什、乌鲁木齐、海拉尔和哈尔滨。定义瞬时星座中所有卫星与地面站间仰角的最大值为星座(对地面站)的最大仰角,对应该最大仰角值的中继卫星有最短的数据下传链路。在1个恒星日内,4种星座方案瞬时最大仰角的取值随时间的变化特性如图4所示,瞬时最大仰角的累积分布如图5所示,4种星座方案瞬时最大仰角的统计特征如表4。

表4 星座系统的最大仰角的统计特征值

星座类型	最大仰角的最小值(°)	最大仰角的最大值(°)	平均最大仰角(°)	最大仰角的标准差(°)
玫瑰星座	31.1316	88.9881	67.4523	13.7959
极轨道星座	27.7350	88.9027	60.4749	15.5988
赤道轨道星座	45.2024	61.2720	54.1182	5.4009
共地面轨迹星座	45.1878	88.4318	72.3325	12.4044

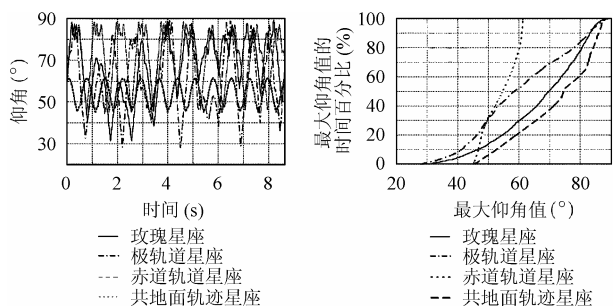


图4 最大仰角随时间的变化 图5 最大仰角的累积分布

由图4、图5和表4可见：虽然赤道轨道星座的最大仰角特性最平稳和规则，但整体取值较小；玫瑰星座和极轨道星座的最大仰角的动态变化范围大，玫瑰星座有最大的瞬时最大仰角值而极轨道星座有最小的瞬时最大仰角值；共地面轨迹星座的最大仰角的动态变化范围较小，且取值始终较大，由图5可看出，1个星座周期中有约40%的时间最大仰角都大于80°。

综合以上分析，在对地面站的覆盖特性上，共地面轨迹星座最优，玫瑰星座次之，极轨道星座较差，赤道轨道星座的最差。

3.3 星座系统的星际链路特性

对于中继卫星系统，星际链路的性能是保证系统性能的关键因素之一。通常，可以采用仰角、方位角和距离的变化特性来描述星际链路实现的难易程度和性能。仰角和方位角表明了用于建立星际链路的天线指向的变化，显然，仰角和方位角的动态范围越大，变化速度越快，对卫星的姿态稳定性和星载天线跟踪性能的要求就越高；距离则表明了星际链路的传输损耗特性，距离越长损耗越大，在天线的指向精度和发射功率相同的情况下，距离越短则数据速率越高。因此，对星座系统而言，星际链路的距离越短对系统的实现越有

利，星际链路的仰角、方位角和距离的变化范围越小、变化速度越慢对系统的实现越有利。

4个星座方案的星际链路拓扑结构如图6所示。其中，玫瑰星座和共地面轨迹星座中每个轨道平面上只有1颗卫星，卫星只和左右相邻轨道面的卫星建立面间星际链路；赤道轨道卫星只有一个轨道面，因而卫星只和左右相邻卫星建立面内星际链路；极轨道星座则同时具有面间和面内星际链路，但逆行轨道面之间无星际链路。根据星座的对称性可知：玫瑰星座和赤道星座中具备代表性的是卫星1与卫星2之间的星际链路；极轨道星座和共地面轨迹星座中具备代表性的是卫星1与卫星2之间，卫星1与卫星6之间的星际链路。各星座方案中星际链路的仰角、方位角和距离特性随时间的变化分别如图7、图8和图9所示，仰角和方位角的标准差，以及距离的均值和标准差特性如表5。

由图7、图8、图9和表5可见：由于赤道轨道星座只

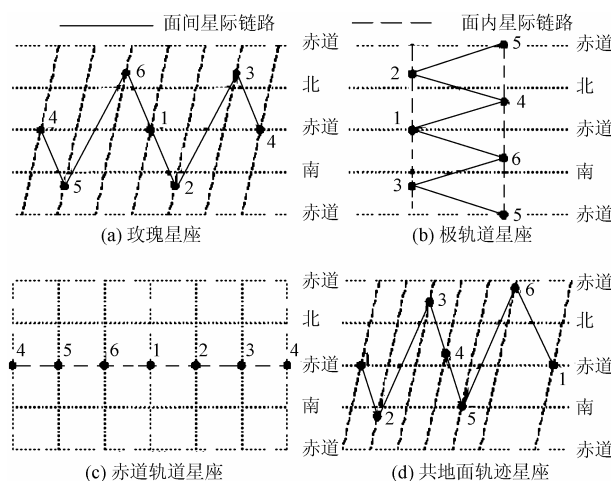


图6 星座的星际链路拓扑结构示意图

表5 星际链路特性的统计特征值

星座类型	星际链路	仰角的标准差(°)	方位角的标准差(°)	距离	
				均值(km)	标准差(km)
玫瑰星座	卫星1 到 卫星2	3.2639	32.6920	26807	1729.4
极轨道星座	卫星1 到 卫星2	0	0	35109	0
	卫星6 到 卫星1	13.8247	124.4133	24714	7593.1
赤道轨道星座	卫星1 到 卫星2	0	0	20270	0
共地面轨迹星座	卫星1 到 卫星2	1.3684	21.0553	28487	688.6
	卫星6 到 卫星1	17.0099	105.3067	21154	10153

有一个轨道面，卫星间保持相对稳定的空间位置关系，其仰角、方位角和距离特性都基本保持不变，因此星际链路天线既不需要指向调整，也不需要控制发射功率，星际链路的实现最容易；玫瑰星座的卫星间具有一定的相互运动，由于各项特性的变化范围都较小且规律，因此星际链路也比较容易实现；极轨道星座中，面内星际链路的各项特性都几乎不变，因而容易实现，但面间星际链路的仰角、方位角和距离变化较大，实现较困难。而且，在现有技术条件下，极轨道星座中逆行轨道面间无法实现星际链路，空中网络存在“缝隙(seam)”；共地面轨迹星座中，卫星1与卫星2之间星际链路的各项特性的变化特性优于玫瑰星座，星际链路的实现较容易，而卫星1与卫星6之间由于卫星运行方向相反，因此星际链路各项特性的变化范围均较大，星际链路的实现困难。

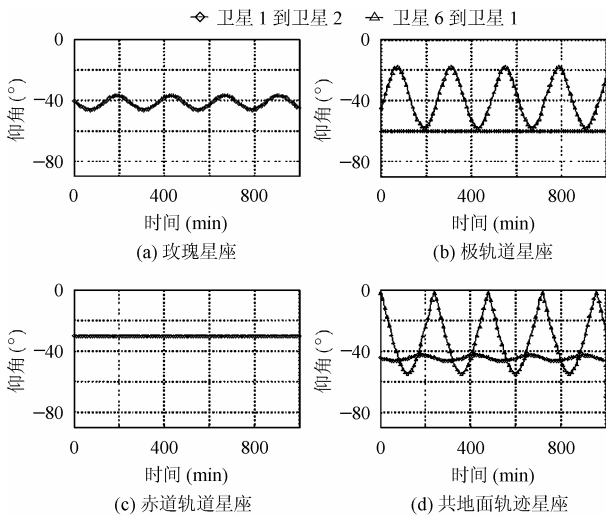


图7 星际链路的仰角随时间的变化

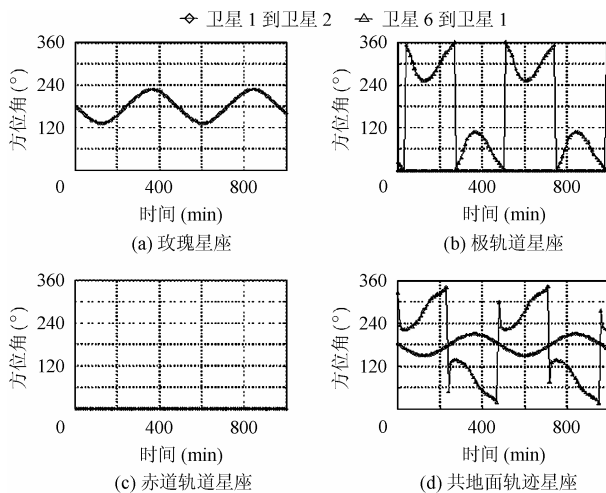


图8 星际链路的方位角随时间的变化

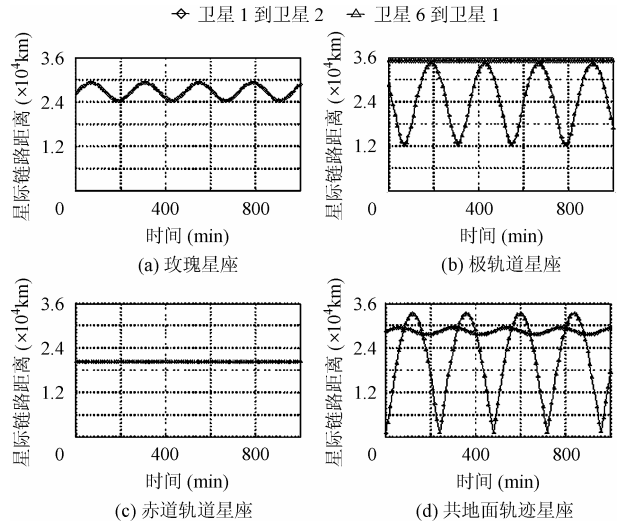


图9 星际链路的距离随时间的变化

综合来看，赤道轨道星座星际链路的实现最容易，玫瑰星座的次之，共地面轨迹星座的较难而极轨道星座的最难。

3.4 性能综合比较

根据对4个星座实例的覆盖特性和星际链路特性的分析和比较，可以知道：

- (1) 赤道轨道星座由于覆盖性能较差，即使星际链路的实现容易，也很难满足中继卫星系统的整体性能需求，因此，该星座形式不宜用作中继卫星系统；
- (2) 极轨道星座对低空空域的覆盖性能尚可，对境内信关站的覆盖特性比玫瑰星座和共地面轨迹星座差，并且，由于逆行轨道面间无星际链路，星座空间网络具有明显的缺陷，因此也不宜用作中继卫星系统；
- (3) 玫瑰星座和共地面轨迹星座都具有较均匀的全球卫星分布特性，两者的全球覆盖特性相当，共地面轨迹星座对我国境内的覆盖特性略优于玫瑰星座，但星际链路特性上稍差，综合来看，两者均比较适合用于中继卫星系统。

4 结束语

理论上，我国的中轨 TDRSS 可以采用多种类型的星座形式。大量文献对常见星座对全球地表的覆盖特性进行过深入的研究，但很少有对星座用作中继系统时的各项覆盖性能进行分析。本文基于我国中轨 TDRSS 星座方案的功能和业务特性，对各种星座在实现中轨 TDRSS 时的覆盖特性和星际链路性能的差别进行了仿真分析和比较，从而确定了适合我国中轨 TDRSS 采用的星座类型。

参考文献

[1] TDRSS. URL: <http://nmssp.gsfc.nasa.gov/tdrss/>.

- [2] Holmes W M. NASA's tracking and data relay satellite system. *IEEE Communications Magazine*, 1978, 16(5): 13 – 20.
- [3] Griethe W, Andreas A, *et al.*. The Russian satellite data and relay network(SDRN). URL:<http://mir.irisz.hu/cucc/hu/misc>.
- [4] Ballard A. Rosette constellations of earth satellites. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, 16(5): 656 – 672.
- [5] Rider L. Optimized polar constellation for redundant earth coverage. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1985, 33(2): 147 – 161.
- [6] Keller H, Salzwedel H, *et al.*. Geometric aspects of polar and near polar circular orbits for the use of intersatellite links for global communication. *IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC'98)*, Ottawa, Canada, May 1998, Vol. 1: 199 – 203.
- [7] 刘刚, 吴诗其. 区域性星座设计. *系统工程与电子技术*, 2002, 24(7): 15 – 18.
- [8] 吴久银, 甘仲明, 朱德生. 共地面轨迹移动卫星通信星座设计. *电子学报*, 1999, 27(6): 88 – 91.
- [9] 杨维廉. 一种区域性中轨道卫星移动通信系统. *中国空间科学技术*, 2001, (2): 1 – 6.
- 吴廷勇: 男, 1975年生, 讲师, 博士生, 研究方向为卫星移动通信和卫星通信网络.
- 朱立东: 男, 1968年生, 副教授, 博士, 研究方向为卫星移动通信和个人通信.
- 吴诗其: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为卫星通信和个人通信.