

# 倾斜轨道同步卫星通信系统及其应用探讨

吴波洋

(电信科学技术第一研究所 上海 200032)

摘要

本文介绍可在赤道平面以外的空间利用 C 频段频谱资源的倾斜轨道同步卫星通信系统,并对具体的星座结构、工作频段、干扰协调和系统方案等作了初步探讨。

关键词 卫星通信 倾斜轨道同步卫星 频率共享 干扰协调

卫星通信的频谱和轨位资源是紧缺和不可再生的。为了充分而有效地利用频谱和轨位资源,地球同步轨道上的邻星间隔已从早期的 5°以上,缩小到如今的 2°左右。因为 C 和 Ku 频段的轨位资源几近枯竭,发达国家正在开发 30/20 GHz 的 Ka 频段,并已推出 50/40 GHz 的 V/Q 频段系统方案。由于地球同步轨道已经过于拥挤,人们正在开发低、中、高轨的非静止卫星星座以及工作在平流层中的高空通信平台(HAPS),其中的一些通信系统已被投入使用。除此之外,大角度倾斜轨道的地球同步卫星也可在赤道平面以外的空间,重复利用静止卫星通信的频谱资源。

## 1 系统结构与工作方式

静止卫星运行在位于赤道平面的、半径约 42 164 km 的圆轨道上,卫星的运行周期与地球的自转周期相同。正是由于具备了上述轨道特征,静止卫星的星下点固定在赤道的某一点上。倾斜轨道同步卫星的轨道半径和运行周期与静止卫星相同,但其轨道平面倾斜于赤道平面。倾斜轨道同步卫星以 24 h 为周期,分别运行在南、北半球上,其间有两次与赤道平面相交。卫

星的星下点轨迹为中心固定在赤道上某点的 8 字形。8 字形星下点轨迹在南北和东西方向上的尺寸由卫星轨道平面的倾角所决定,倾角越大,星下点轨迹在南北方向上的两个顶点的间距以及在东西方向上的宽度也越大。

图 1 以在时间上等间隔的 24 个特征点(其中有两个重叠落在东经 121°的赤道上)标注出 45°倾角卫星的星下点轨迹。由图 1 中可见,8 字形轨迹的南北顶点分别在南纬和北纬 45°上,轨迹在东西方向上的宽度将近 20°。在图 1 中还可以看到五条曲线,它们分别为对应于倾斜卫星在北半球的顶点、东西两个极限点和以“x”标注的两个特征点的 30°地面天线仰角服务区。这五条曲线所共同包括的中央区域大致为倾斜卫星在北半球的 30°仰角服务区。

考虑到通信卫星之间的相互干扰可以通过增加轨位间隔而得以减弱和消除,因此,只要令倾斜卫星工作在远离赤道平面的南北两个区间,就可避免它与静止通信卫星之间的互扰。倾斜轨道同步卫星的这一特点可被利用于在赤道平面以外的空间开发和利用 C 频段和 Ku 频段的频谱资源。由于倾斜卫星的空间

发展的势头。

【作者简介】刘彩,中国通信学会副理事长兼秘书长,中国科

学技术协会理事,信息产业部《电信法》起草专家咨询委员会主任委员,教授级高级工程师,北京邮电大学兼职教授。

## How to Keep the Development of Telecom Industry in China

Liu Cai

(China Institute of Communications, Beijing 100804)

**Abstract** This paper introduces the position of telecom industry in China and explain that our telecom industry turns into a new phase. We must extract experience and lesson of international telecom industry, insure the policy of China telecom in right way.

**Key words** telecom industry, incom of service, reform of telecom

(收稿日期:2002-10-22)



位置始终处在周期性变化中,地面天线应该具备跟踪能力或者程控驱动能力。由于倾斜卫星在一个半球上的工作时间短于12h,单靠一颗卫星不能提供全天服务。

能够连续运作的倾斜轨道同步卫星通信系统应由三颗或更

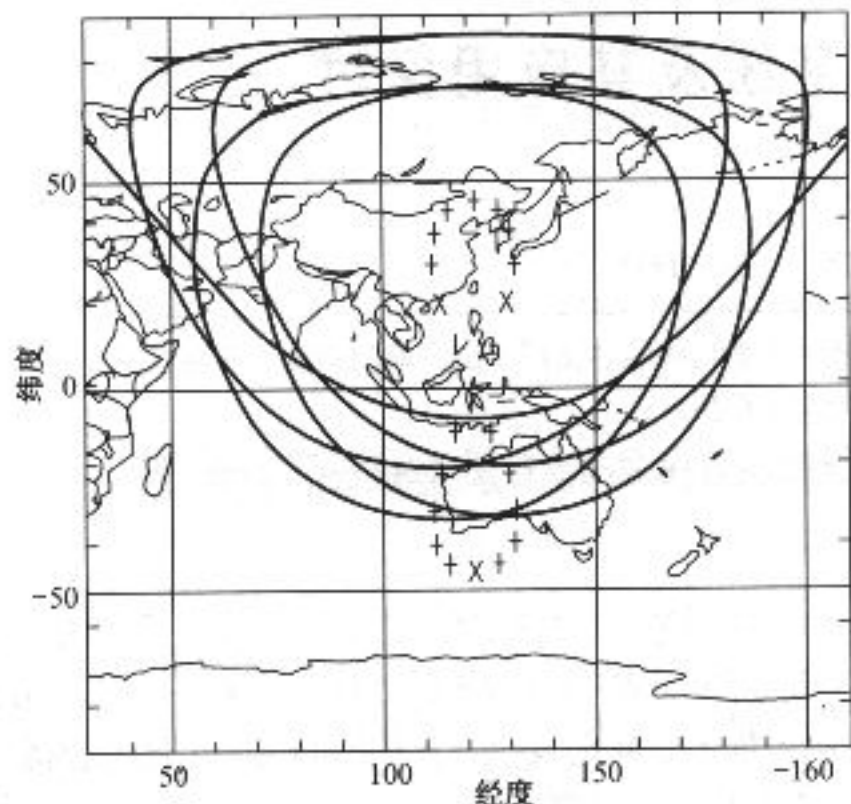


图1 倾斜轨道同步卫星的星下点轨迹和30°仰角服务区

多的卫星所组成。系统中所有卫星的星下点都应在时间上等间隔地落在同一个8字形轨迹上。在由三颗卫星组成的最小系统中,任一时刻都有两颗位于高纬度的卫星分别在南、北半球提供服务,另一颗运行在低纬度区间的卫星则用于备用切换。在一天24h内,每颗卫星都将有两个8h分别工作在南、北半球的服务区中,另外的8h则处于备用状态。当备用星在8字形轨迹上运行到纬度与工作星相同时,地面天线的指向应从工作星切换至备用星。地面天线在一天中需作三次指向切换,每次切换后将以同样的方式跟踪不同的卫星。

倾斜卫星的工作纬度较高,它可为静止卫星不能覆盖的高纬度地区和南北两极提供服务。图2为45°倾斜卫星运行到北半球的顶点时所看到的地球,其中标有五个对应于不同特征点的10°仰角服务区,方位角和仰角分别指在轨卫星天线指向地球表面的方位角和仰角。由图2中可见,北极也落在地面天线仰角高于10°的共同服务区内。

与覆盖全球的低、中轨卫星星座相比,倾斜卫星的服务区较窄,但其地面天线的对星跟踪速度低、切换卫星次数少,系统的技术难度和建网成本都相对较低。为了有效利用卫星资源,位于南、北半球的国家可以通过国际合作,分别使用倾斜卫星系统的南、北两个服务区。

## 2 工作频段与系统容量

在目前的技术条件下,静止通信卫星的最小轨位间隔通常

为2°或2.5°。只要不使用天线方向性很差的移动通信终端,工作纬度在10°以上的倾斜卫星系统与赤道平面上的静止卫星系统之间不存在不可接受的干扰。由于倾斜卫星与LEO、MEO等非静止卫星通信系统都工作在赤道平面以外的低、中纬度区间,这两类系统之间无法通过空间隔离避免干扰。因此,倾斜卫星系统应注意避开其它非静止卫星系统的工作频段。根据有关资料,Iridium和Globalstar等系统的移动终端工作于L和S频段,Globalstar系统的馈线链路占用了部分C扩展频段,Ku频段之中有Skybridge等系统,Iridium和Teledesic等系统的馈线链路则分别占据部分Ka频段。由此看来,C频段尚存可供倾斜轨道同步卫星使用的大段频率资源。只要倾斜卫星在运行至低纬度区间时关闭所有的通信转发器,并且不令系统内的地面天线指向地球同步轨道,倾斜卫星系统就可以通过空间隔离方式,与静止卫星通信系统共同工作在常规C频段。

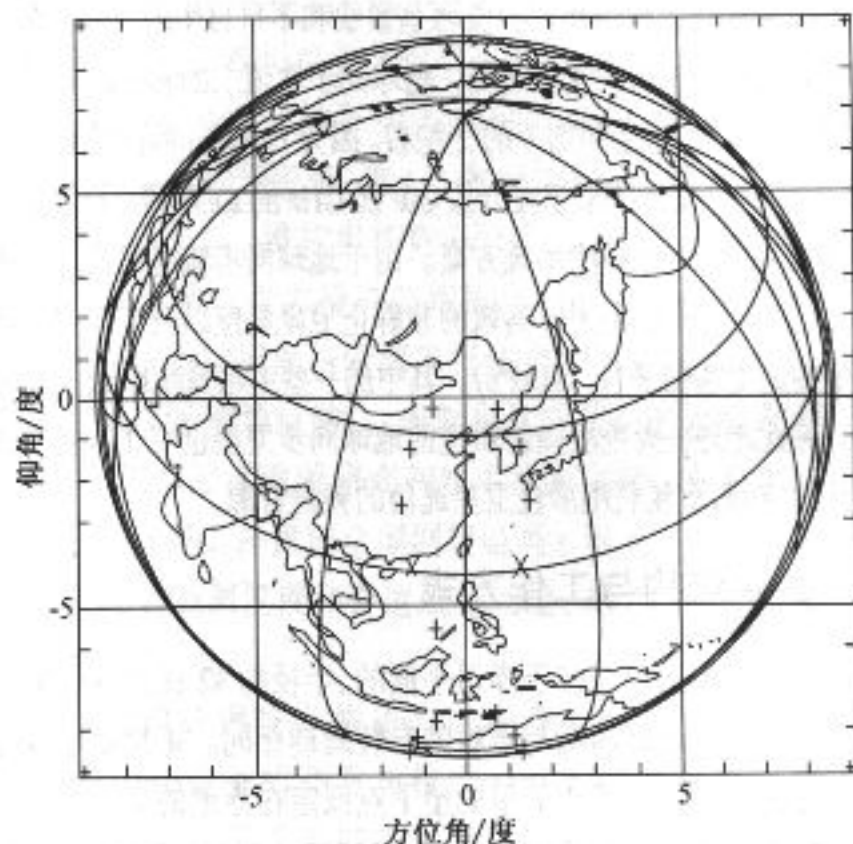


图2 45°倾角倾斜轨道同步卫星的10°仰角服务区

与静止卫星系统相似,C频段倾斜轨道卫星系统也要与地面微波通信系统进行干扰协调。由于倾斜卫星的工作仰角比静止卫星高,倾斜卫星与地面微波站之间的互扰也相对较轻。值得注意的是,倾斜卫星系统中的部分地面天线指向需作大角度地跟踪对星,地球站的微波环境测试和干扰协调工作都比较复杂。为此,在系统设计中应该通过限制上行功率谱密度和避免使用小口径地面天线等手段,达到减轻地球站与微波站间互扰的目的。

假设同频段、同服务区的静止卫星之间的最小轨位间隔为2.5°,则在赤道平面上只能容纳144个静止卫星轨位。在相同的条件下,轨道倾角为45°的两组倾斜轨道卫星的8字形卫星链之间的最小间距为22.5°,即在环赤道带上可以均匀安排16个倾

斜轨道同步卫星通信系统。相邻两颗卫星的地心夹角不小于 $2.5^\circ$ 时,在一个倾斜轨道卫星系统的8字形卫星链中最多可放置40颗卫星,其中可有28颗卫星同时工作在南、北纬 $20.7^\circ$ 以上的高纬度区间。由此算来,在16个倾斜轨道系统中可有448颗C频段卫星同时工作,卫星数量数倍于地球同步轨道。如果每颗卫星在一个服务区中的工作时间长于8h,即切换业务的纬度低于 $20.7^\circ$ ,则在卫星链中可以有更多的卫星同时工作。上述估算结果表明,通过开发空间资源,将地球同步卫星的工作区间从赤道平面扩展到纬度在 $10^\circ$ 余度到 $45^\circ$ 的两个环带上,可以更为充分地利用C频段频谱资源。

### 3 最小系统的星下点运行轨迹

为了使最小系统中的三颗卫星的星下点在时间上等间隔地落在同一个8字形轨迹上,应在地球同步轨道环上等间距地安排三个倾角相同的倾斜轨道,并且使三颗卫星在各自轨道上的相位,即卫星所在位置与倾斜轨道在赤道平面上的交点之夹角满足以下的要求。当时间 $t$ 为0时,卫星1位于倾斜轨道1与赤道平面的交点上,即卫星1在其轨道上的相位为 $0^\circ$ ;卫星2的轨道交点比卫星1超前 $120^\circ$ ,而当时间 $t$ 为0时,卫星2在轨道2上的相位为 $-120^\circ$ ,这将使卫星2与卫星1的星下点轨迹相重合;类似地,卫星3的轨道交点比卫星1滞后 $120^\circ$ ,卫星3在其轨道上的相位则为 $+120^\circ$ 。表1列出了在24h中,上述三颗卫星的星下点相对于8字形轨迹中心的经、纬度偏移值。表中的 $\phi$ 为地球在 $t$ 小时内围绕其自转轴所转过的角度, $\Phi_1$ 为卫星1在时间 $t$ 绕地球所转的角度, $\Delta\Phi_1$ 为卫星1所转角度与地球所转角度之差, $\theta_1$ 为卫星1在时间 $t$ 所处的纬度(北纬), $\Delta\Phi_2$ 、 $\theta_2$ 、 $\Delta\Phi_3$ 和 $\theta_3$ 分别为卫星2和3的相应数据。

由表1可见,当 $t=0$ 时,卫星1位于8字形轨迹中心点,卫星2的经纬度相对于中心点分别为西向 $9.2^\circ$ 和南向 $37.8^\circ$ ,卫星3则位于中心点的东向 $9.2^\circ$ 和北向 $37.8^\circ$ 上。这时,卫星2和卫星3分别为南半球和北半球提供服务,卫星1则处于休眠状态。当 $t=2$ 时,卫星1向北偏西运行到中心点的西向 $7.8^\circ$ 和北向 $22.7^\circ$ 上,卫星3则向南运行到中心点的东向 $7.8^\circ$ 和北向 $22.7^\circ$ 上,原先工作在卫星3上的通信业务将在这时切换到卫星1上。与此同时,卫星2则向南偏东运行到南半球的顶点上。这以后,卫星1和2向北运行,卫星3则向南运行。到 $t=10$ 时,卫星1位于北半球的顶点,卫星2和3则同在南纬 $22.7^\circ$ 上,工作在卫星2上的通信业务将在这时向卫星3转移。同样地,下一次的通信业务切换将在 $t=18$ 时进行。

表1 最小系统中的卫星经纬度偏移值

| $t$ (h) | $\phi$<br>(度) | $\Phi_1$<br>(度) | $\Delta\Phi_1$<br>(度) | $\theta_1$<br>(度) | $\Delta\Phi_2$<br>(度) | $\theta_2$<br>(度) | $\Delta\Phi_3$<br>(度) | $\theta_3$<br>(度) |
|---------|---------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| 0       | 0             | 0.0             | 0.0                   | 0.0               | -9.2                  | -37.8             | 9.2                   | 37.8              |
| 1       | 15            | 10.7            | -4.3                  | 10.5              | -5.8                  | -43.1             | 9.7                   | 30.0              |
| 2       | 30            | 22.2            | -7.8                  | 20.7              | 0.0                   | -45.0             | 7.8                   | 20.7              |
| 3       | 45            | 35.3            | -9.7                  | 30.0              | 5.8                   | -43.1             | 4.3                   | 10.5              |
| 4       | 60            | 50.8            | -9.2                  | 37.8              | 9.2                   | -37.8             | 0.0                   | 0.0               |
| 5       | 75            | 69.2            | -5.8                  | 43.1              | 9.7                   | -30.0             | -4.3                  | -10.5             |
| 6       | 90            | 90.0            | 0.0                   | 45.0              | 7.8                   | -20.7             | -7.8                  | -20.7             |
| 7       | 105           | 110.8           | 5.8                   | 43.1              | 4.3                   | -10.5             | -9.7                  | -30.0             |
| 8       | 120           | 129.2           | 9.2                   | 37.8              | 0.0                   | 0.0               | -9.2                  | -37.8             |
| 9       | 135           | 144.7           | 9.7                   | 30.0              | -4.3                  | 10.5              | -5.8                  | -43.1             |
| 10      | 150           | 157.8           | 7.8                   | 20.7              | -7.8                  | 20.7              | 0.0                   | -45.0             |
| 11      | 165           | 169.3           | 4.3                   | 10.5              | -9.7                  | 30.0              | 5.8                   | -43.1             |
| 12      | 180           | 180.0           | 0.0                   | 0.0               | -9.2                  | 37.8              | 9.2                   | -37.8             |
| 13      | 195           | 190.7           | -4.3                  | -10.5             | -5.8                  | 43.1              | 9.7                   | -30.0             |
| 14      | 210           | 202.2           | -7.8                  | -20.7             | 0.0                   | 45.0              | 7.8                   | -20.7             |
| 15      | 225           | 215.3           | -9.7                  | -30.0             | 5.8                   | 43.1              | 4.3                   | -10.5             |
| 16      | 240           | 230.8           | -9.2                  | -37.8             | 9.2                   | 37.8              | 0.0                   | 0.0               |
| 17      | 255           | 249.2           | -5.8                  | -43.1             | 9.7                   | 30.0              | -4.3                  | 10.5              |
| 18      | 270           | 270.0           | 0.0                   | -45.0             | 7.8                   | 20.7              | -7.8                  | 20.7              |
| 19      | 285           | 290.8           | 5.8                   | -43.1             | 4.3                   | 10.5              | -9.7                  | 30.0              |
| 20      | 300           | 309.2           | 9.2                   | -37.8             | 0.0                   | 0.0               | -9.2                  | 37.8              |
| 21      | 315           | 324.7           | 9.7                   | -30.0             | -4.3                  | -10.5             | -5.8                  | 43.1              |
| 22      | 330           | 337.8           | 7.8                   | -20.7             | -7.8                  | -20.7             | 0.0                   | 45.0              |
| 23      | 345           | 349.3           | 4.3                   | -10.5             | -9.7                  | -30.0             | 5.8                   | 43.1              |

### 4 系统方案设想与特点

#### (1) 卫星星座与扩容

系统中的卫星数量可根据业务量弹性安排。例如,在由5颗卫星所组成的系统中,南、北半球将各有两颗卫星同时工作。系统扩容时,理论上存在着逐颗增加卫星的可能性。但在这时,需要改变原有卫星的轨道和相位。通过先改变然后恢复某一卫星的高度,可以很方便地改变该卫星在其轨道上的相位。但是,改变卫星轨道将耗费大量燃料,缩短卫星寿命。因此,在系统需要扩容时,为了不改变原系统所用卫星的轨道,通常只能整数倍地增加卫星。

众多的卫星运行在同一个8字形卫星链中,将对系统设计和运行管理带来一些新的问题。例如,如何在有限的频段中安排遥控和遥测载波,如何保证倾斜卫星与静止卫星在其轨道交点的运行安全,这些问题有待于进一步的分析和研究。

#### (2) 卫星天线

在倾斜轨道同步卫星的8h工作期间,星下点的运行轨迹呈马蹄形。当卫星的轨道倾角为 $45^\circ$ 时,马蹄形轨迹的经度变化



范围将近  $20^\circ$ , 纬度变化范围在  $20.7^\circ$  到  $45^\circ$  之间。为了将星上的功率资源集中用于服务区内, 卫星可采用凝视天线技术, 在运行过程中控制天线指向, 使其始终对准经度与 8 字形轨迹中心相同、纬度约为  $32^\circ$  的服务区中心。

为了简化设计和降低成本, 也可将卫星天线的指向固定在星下点上, 使天线覆盖区随星下点的马蹄形运行轨迹而移动。这时, 卫星的服务区将是移动中的天线波束在 8 h 工作期间所共同覆盖的一个局部区间。假设卫星天线垂直指向地面, 它的半功率波束宽度为  $15^\circ$ , 则其服务区大致相当于地面天线的  $30^\circ$  仰角服务区。由图 1 可见分别对应于倾斜卫星的五个特征星下点的  $30^\circ$  仰角服务区, 它们所共同覆盖的区域大致相当于天线波束宽度为  $15^\circ$  的倾斜卫星服务区。其经度范围大致在 8 字形轨迹中心点的正负  $45^\circ$  之间、纬度则大致在  $0^\circ$  与  $60^\circ$  之间。C 频段卫星天线可采用固定指向星下点、半功率波束宽度约为  $17^\circ$  的圆锥喇叭, 其覆盖范围包括地面天线仰角在  $10^\circ$  以上的所有地区。在图 2 中可以看到由五个倾斜卫星特征点的  $10^\circ$  仰角服务区所共同覆盖的区域。在分别被图 1 和图 2 所采用的两种地图投射方式中, 图 2 方式客观地反映了倾斜轨道同步卫星所看到的地球。由图 2 可见, 共同服务区在准全球波束中占有相当大的比例。由此可以认为, 固定指向星下点的天线浪费在共同服务区外的射频功率很有限。

圆锥喇叭的成本低、结构简单, 但其增益比通常的 C 频段卫星天线低了大约 10 dB。为了避免因卫星天线增益低而提高对地面天线和设备的性能要求, 卫星应采用复合馈源或赋形反射面等天线技术, 以提供高增益的准全球波束。

### (3) 卫星转发器的开关控制

倾斜卫星在运行到低纬度区间时, 应该关闭转发器的功率输出, 以避免干扰工作在赤道平面上的静止通信卫星。如果每天都要两次开关功率放大器, 放大器可能经受不起如此频繁的开关操作; 如果采取维持功率放大器的工作状态, 单靠切断输入信号源以限制功放输出的方式, 则需就功放的静态噪声输出对静止卫星系统的影响作准确的评估。对于这一问题, 有必要作进一步的分析研究。

### (4) 卫星测控站选址

在图 1 中可以看到, 当卫星运行到北半球的顶点时, 它的  $30^\circ$  仰角服务区可以延伸到南纬  $5^\circ$  左右。由此可见, 可以全程控制  $45^\circ$  倾斜卫星的测控站应该建在赤道附近。如果地理条件不满足, 则需在南北半球分别建站。

在图 1 中还可看到, 当卫星运行到北纬  $20.7^\circ$  的切换点时, 它的  $30^\circ$  仰角服务区向南覆盖到南纬  $30^\circ$ 。由此可见, 只要将测控站建在南、北纬  $30^\circ$  之间, 就能分别控制倾斜卫星在南北半球的开关和切换。

### (5) 地面天线与设备

倾斜卫星系统中的地面天线需对卫星进行自动跟踪和切换。位于星下点轨迹附近或者在其包含范围以内的地球站, 天线指向的变化范围较大, 可能需要方位角能作  $360^\circ$  旋转的全动天线设计。

倾斜卫星与地球站之间的相对位置和距离随时间而变, 其多普勒频移大于静止卫星。因此, 数字调制解调器中需要容量更大的缓存器。

由于地球站与卫星在空间关系上的不确定性, 倾斜卫星通信系统中的地球站遭受日凌干扰的机会多于静止卫星系统, 其时间也较难预报。此外, 地面系统在一天三次的天线切换期间将暂停工作。系统设计中应对此加以考虑。

### (6) 椭圆轨道卫星

椭圆倾斜轨道同步卫星是倾斜轨道同步卫星的特例。椭圆倾斜轨道同步卫星的运行周期与地球自转周期相同, 但它运行在一个轴比相当大的椭圆轨道上, 其星下点轨迹为不对称的 8 字形。大椭圆倾斜轨道卫星在其运行周期的大部分时间内都运行在一个半球的高纬度区间。因此, 只需两颗倾角相同、远地点在同一个半球且其星下点经度相差  $180^\circ$  的大椭圆轨道卫星, 就可以组成一个系统, 为该半球部分经度区间的高纬度用户提供服务。由于卫星轨道的特殊性, 椭圆轨道卫星的传输距离、传输损耗和时延都随时间而变, 其变化量还相当大, 因此不利于系统的设计和使用。

## 5 结束语

由于历史原因, 中国错过了在国际电联登记卫星轨位的最佳时机。在亚太地区上空, 部分或全部覆盖中国领土的可用 C 频段和 Ku 频段通信卫星轨位都是 30 多个。其中, 属于中国(包括香港特别行政区)的 C 和 Ku 频段轨位分别只有 9 个和 7 个。由于邻星协调的地位相对落后, 中国的部分轨位资源还存在着某些使用限制。中国对卫星通信容量的需求很大, 但是, 所占有的轨位资源却相对有限。为了满足通信需求, 除了租用他国的通信转发器资源、以及有争议地租用轨位发射卫星外, 中国应当着手开发卫星通信的新频段和新技术。

Ka 频段卫星通信和低、中轨非静止卫星通信系统是当前的两个主要发展方向。考虑到国内在毫米波频段的通信元器件和设备方面受到条件限制, 在研究和开发 Ka 频段通信卫星和卫星通信设备上, 仍需要长时间和大投入。我国东南部的经济和人口密度中心属于强降雨区, 强降雨衰减也将影响和限制 Ka 及更高频段的应用前景。考虑到低、中轨卫星星座及其通信系统对技术和资金实力的要求高, 在频率申请和协

