

卫星移动通信新技术

吴诗其 胡剑浩 吴晓文 曹世文 等 编著



国防工业出版社

卫星移动通信新技术

吴诗其 胡剑浩 吴晓文 曹世文 等编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

卫星移动通信新技术/吴诗其等编著. —北京:国防工业出版社, 2001 (2001.6 重印)

ISBN 7-118-02334-5

I. 卫… II. 吴… III. 卫星通信; 移动通信 IV. TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 33997 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18¼ 431 千字

2001 年 1 月第 1 版 2001 年 6 月北京第 2 次印刷

印数: 501—2000 册 定价: 26.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

序

近年来国际上迎接信息时代的来临,大力加快建设国家信息基础结构(NII),并进一步扩展到全球信息基础结构(GII)。人们普遍希望使用移动通信、个人通信,甚至全球个人移动通信。由此,无线通信将大大发挥作用,不仅广泛建设城市蜂窝网,还要加强发展天空卫星通信。就是说,为了真能实现全球个人通信,必须依靠卫星移动通信。传统使用的、位于高空 36000km 的同步卫星(也即对地球静止轨道的卫星, GEO)将继续发掘其巨大潜力,让它发挥更多的有用贡献。但这还不够,卫星移动通信还要考虑充分利用位于高空约 1000km/10000km 的低/中轨道(LEO/MEO)的卫星族。对此,国际上掀起一股热潮,纷纷提出不同的低/中轨道卫星移动通信的设计方案,并具体分析各种方案的实用性和经济性。这是不可阻挡的、势在必行的热潮,我们应当密切注意其动向,并刻不容缓地在国内自行开始进行论证和研究其有关技术及经济等具体问题。

电子科技大学信息系统研究所的卫星通信课题组,在吴诗其教授亲自带领下,不少年富力强的中青年骨干同志,团结合作,看准这一重要方向,近几年来得到国家的大力支持,积极认真地进行卫星移动通信新技术的研究,在国内首先开展关于低/中轨道卫星用于全球个人通信的具体研究。在全体同志的奋发努力下,几年来研究工作全面推动,取得了多方面的成果。相应地,把研究成果分别写出为数很多的论文,在重要期刊上发表和在国际会议上宣读。现在,把历年发表的论文汇编成集,得到出版社的合作,作为整本书正式出版。这对全国从事卫星通信的科教工作者是一本极好的参考和学习资料。我个人经常阅读这些论文,觉得覆盖面广、内容丰富,乐意为出版论文集作序,并向读者推荐。

中国科学院院士
张 煦

前 言

卫星移动通信系统是实现全球个人通信不可缺少的重要组成部分,也是第三代移动通信系统 IMT-2000 的一部分。近年来,相应的技术已成为一个研究的热点。

本专著收集了课题组多年来在卫星移动通信技术方面发表论文的一部分,包括星座设计、链路技术、多址技术、切换与信道分配技术、小卫星通信技术、无线 ATM 技术和对策研究共七个专题。在《星座设计》的专题研究中,提出了星群最大离散化的星座设计方法和适用于区域性系统的“时间决定”星座设计方法,给出了中国的多种星座方案;《链路技术》主要研究系统的链路干扰问题和星际链路网络的路由选择问题,以及链路的均衡、(非线性)补偿和传输特性的实时仿真器设计与实现;《多址技术》包括了对码分多址(CDMA)、分组预约多址(PRMA)和混合多址技术的研究;《切换与信道分配技术》着重研究低轨卫星通信系统的切换模型以及接入方案对系统内切换请求概率和系统性能的影响,同时讨论了不同业务的信道分配问题与基于神经网络的信道分配算法;《小卫星通信技术》阐述了技术发展趋势、软件无线电技术的应用前景,并研究了数据存储/转发系统的协议和实现技术;《无线 ATM 技术》专题中,讨论了系统体系结构和关键技术,对多址访问协议和信道分配算法、定时恢复技术、差错控制技术和越区切换技术等进行了深入研究;《对策研究》在深入研究国外技术发展的基础上,结合我国国情和需求,提出了发展我国卫星移动通信的目标、实施步骤和方法,以及实现我国综合卫星通信系统的设想。

支持本课题组开展研究工作的项目如下:

- 预研项目《非线性卫星链路的均衡与补偿研究》,1988 ~ 1990;
- 电子部基金项目《抗干扰移动通信多卫星体制仿真技术研究》,1993 ~ 1995;
- “863”计划项目《移动卫星通信技术的跟踪研究》,1993 ~ 1995;
- 与 Inmarsat 驻华代表处合作项目《基于 Inmarsat - C 的农村信息网(Agrinet)演示软件》,1995 ~ 1996;
- “863”计划项目《我国发展卫星移动通信的对策研究》,1996 ~ 1997;
- 电子部基金项目《新的交换体制研究》,1996 ~ 1998;
- 预研项目《卫星移动通信新体制研究》,1996 ~ 1999;
- 中兴通讯基金项目《我国新一代综合卫星通信系统体制研究》,1999 ~ 2000;
- “863”计划项目《卫星移动通信方案与设计》,1999 ~ 2000;
- 预研协作项目《小卫星监控与数据处理》,1999 ~ 2000;
- 预研项目《卫星移动通信系统评估技术研究》,2000 ~
- 中兴通讯基金项目《移动 IP 关键技术研究》,2000 ~
- 电科院基金项目《天基信息综合网关键技术研究》,2000 ~

值此,谨向支持课题组研究工作的主管部门、有关单位和机构以及专家(组)表示诚挚的谢意。

本书的作者有:吴诗其教授、胡剑浩博士、吴晓文博士、曹世文博士、凌翔博士、冯钢博士、刘刚博士、钱敬华、成林、李涛博士、李兴博士、廖笠、李晓坪、郑露、张春宇和蒋峙。此外,李乐民院士和香港城市大学 Prof. Lawrence Yeung 对本课题组一些成员的研究工作进行了指导,特此表示衷心的感谢。

编 者

目 录

星 座 设 计

1 中国的三种非同步轨道卫星移动通信系统星座方案	1
1.1 引言	1
1.2 星座设计中的几个重要问题	2
1.3 低轨系统星座方案	3
1.4 椭圆轨道系统星座方案	4
1.5 中轨系统星座方案	4
1.6 结论	5
参考文献	5
2 中国低轨移动卫星通信系统星座设计	6
2.1 引言	6
2.2 轨道参数的选择	6
2.3 覆盖分析	8
2.4 结论	12
参考文献	12
3 移动卫星通信系统低椭圆轨道星座设计	13
3.1 引言	13
3.2 系统星座轨道参数的选择	14
3.3 星座相位优化设计	15
3.4 覆盖特性统计结果	16
3.5 结论	17
参考文献	17
4 中轨移动卫星通信系统星座方案研究	18
4.1 引言	18
4.2 轨道参数算法讨论	19
4.3 星座设计的优化方法	20
4.4 我国中轨卫星移动通信系统的星座方案	21
4.5 结论	22
参考文献	22
5 区域性中轨道卫星移动通信系统“时间决定”星座设计	24
5.1 引言	24
5.2 轨道的空间几何关系	25
5.3 “时间决定”星座设计	25

5.4 用于中国的星座方案	28
5.5 结论	30
参考文献	30
6 卫星移动通信星座设计新技术和几个相关问题的研究	32
6.1 引言	32
6.2 双层轨道星座	32
6.3 地面蜂房固定的星座设计方法	34
6.4 星座设计与系统干扰	36
6.5 星座设计与卫星备份体制	38
6.6 星座设计与信关站选址	39
6.7 结论	39
参考文献	40

链 路 技 术

7 非同步轨道卫星移动业务馈送链路的干扰研究	41
7.1 引言	41
7.2 轨道机制及空间几何关系	42
7.3 干扰计算	43
7.4 数字实例及分析	45
7.5 结论	47
参考文献	48
8 卫星移动通信系统中星际链路背景干扰分析模型	49
8.1 引言	49
8.2 星座空间位置关系算法	50
8.3 背景噪声分析模型和状态空间的简化	50
8.4 计算机仿真	52
8.5 结论	53
参考文献	53
9 具有星际链路的 LEO&MEO 双层卫星网络路由策略研究	54
9.1 引言	54
9.2 基于 ATM 传输交换技术的卫星网络体系结构	55
9.3 星际链路路由策略和接入控制	57
9.4 仿真和数字结果	59
9.5 结论	62
参考文献	63
10 具有星际链路的卫星移动通信网络性能分析	64
10.1 引言	64
10.2 星际链路网络拓扑结构和信息的平均传输距离	65
10.3 分组交换信息过网时延分析	66
10.4 星际链路网络电路交换修正 Erlang 呼损公式	68

10.5 数值分析	69
10.6 结论	70
参考文献	71
11 部分全连接星际链路网络动态路由策略研究	72
11.1 引言	72
11.2 部分全连接星际链路网络模型	73
11.3 自适应状态判决路由策略 ASDR	74
11.4 常规的路由策略在星际链路网络中的性能	76
11.5 仿真和数字结果	77
11.6 结论	78
参考文献	78
12 实时低轨卫星移动通信信道模拟器设计	80
12.1 引言	80
12.2 低轨卫星移动通信信道模型	81
12.3 计算机仿真实验结果	83
12.4 结论	85
参考文献	85
13 A Modified Adaptive Compensation Scheme for Nonlinear Bandlimited Satellite Channels	86
13.1 Introduction	86
13.2 Modified Algorithm for APD	87
13.3 Computer Simulation Results	90
13.4 Conclusions	92
References	92

多 址 技 术

14 非静止轨道移动卫星通信中 CDMA 误码性能分析	93
14.1 引言	93
14.2 信道模型	93
14.3 误码率分析	94
14.4 有分集的平均误码分析	96
14.5 数值计算与讨论	96
14.6 结论	97
参考文献	97
15 低轨卫星移动通信中扩频 S - ALOHA 协议吞吐性能分析	99
15.1 引言	99
15.2 系统概述及信道模型	99
15.3 平均误码率的分析	100
15.4 CDMA 的吞吐量分析	101
15.5 数值计算与讨论	102

15.6 结论	103
参考文献	103
16 分组卫星话音/数据混合多址协议性能研究	104
16.1 引言	104
16.2 协议的描述与结构	105
16.3 协议性能分析	105
16.4 数值计算及讨论	107
16.5 结论	108
参考文献	108
17 优先级与自适应 PRMA 协议的性能研究	109
17.1 引言	109
17.2 PRMA 协议	110
17.3 Pprma 和 Aprma 协议	111
17.4 系统仿真模型	111
17.5 协议性能仿真	112
17.6 结论	118
参考文献	118
18 一种动态利用码资源的 CDMA 系统性能研究	119
18.1 引言	119
18.2 协议描述	119
18.3 协议模型	120
18.4 数值实例及仿真结果	123
18.5 结论	124
参考文献	124

切换与信道分配技术

19 低轨卫星移动通信系统切换模型	125
19.1 引言	125
19.2 动态平衡话务模型	125
19.3 切换呼叫到达率和信道平均占用时间	127
19.4 切换方案	128
19.5 系统切换性能分析	131
19.6 结论	132
参考文献	132
20 低轨卫星移动通信系统接入方案研究	134
20.1 引言	134
20.2 接入方案	135
20.3 非均匀分布业务密度模型	137
20.4 系统仿真结果	138
20.5 结论	140

参考文献	140
21 移动通信系统信道分配的神经网络算法	141
21.1 引言	141
21.2 Kohonen 的自组织模型及其改进	142
21.3 移动通信信道分配的神经网络算法	143
21.4 仿真结果分析	145
21.5 结论	145
参考文献	146
22 用 LEO 卫星辅助地面蜂房网实现切换的方案	147
22.1 引言	147
22.2 系统方案描述	147
22.3 数学模型建立	148
22.4 数字实例与讨论	150
22.5 结论	152
参考文献	152
23 Efficient Channel Borrowing Strategy for Multimedia Wireless Networks	153
23.1 Introduction	153
23.2 Channel Borrowing Strategy	154
23.3 Analytical Model for a Simplified System	156
23.4 Numerical and Simulation Results	158
23.5 Conclusions	161
References	161

小卫星通信技术

24 软件无线电技术在微型卫星通信中的应用	162
24.1 引言	162
24.2 软件无线电台	163
24.3 软件无线电技术在微型卫星通信系统中的应用	164
24.4 现阶段实施方案的设想	166
24.5 结论	167
参考文献	167
25 微型卫星技术及其在通信中的应用	168
25.1 引言	168
25.2 微型卫星应用技术概述	168
25.3 低轨微型卫星在数据存储转发通信领域内的应用	169
25.4 国外的微型卫星技术发展情况	170
25.5 关于建立我国微型卫星 S&F 通信系统的设想	173
25.6 结论	174
参考文献	174

26 小卫星存储/转发数据通信系统设计	175
26.1 引言	175
26.2 系统构成	176
26.3 小卫星数据系统通信协议和信令结构	177
26.4 用户移动性和位置管理	179
26.5 实现技术	180
26.6 结论	181
参考文献	181

无线 ATM 技术

27 无线 ATM 通信网的关键技术	183
27.1 引言	183
27.2 协议分层模型与网络结构	184
27.3 物理层	185
27.4 多址访问控制协议	186
27.5 数据链路控制协议	188
27.6 移动管理与控制技术	189
27.7 结论	190
参考文献	190
28 无线 ATM 通信网多址访问协议与信道动态分配算法研究	192
28.1 引言	192
28.2 无线 ATM 通信网系统描述	193
28.3 ORMA 多址访问控制协议	193
28.4 DCA - BT 信道动态分配算法	194
28.5 系统仿真与性能分析	197
28.6 结论	200
参考文献	200
29 无线 ATM 通信网的定时信息恢复技术研究	202
29.1 引言	202
29.2 无线 ATM 通信网的 CBR 业务接入	203
29.3 异步剩余时间标签算法 (ARTS)	203
29.4 对付 ARTS 较大延时抖动和高丢失率的措施	207
29.5 结论	210
参考文献	210
30 Dynamic Slot Allocation Multiple Access Protocol for Wireless ATM Networks	212
30.1 Introduction	212
30.2 System Architecture And Multimedia Traffic Description	213
30.3 Dsama Protocol	215
30.4 Simulation Results and Analysis	221

30.5	Conclusions	226
	References	226
31	A New Adaptive Error Correction Scheme for Wireless ATM Networks	227
31.1	Introduction	227
31.2	Background of Mobile Environment and Multimedia	228
31.3	Adaptive Error Correction Scheme	229
31.4	AFEC Technique in Wireless ATM Networks	230
31.5	Adaptive SARQ and Code Combining Techniques	233
31.6	Simulation Results and Analysis	234
31.7	Conclusions	237
	References	237
32	无线 ATM 通信网的越区切换控制	238
32.1	引言	238
32.2	现有的几种越区切换控制方式	238
32.3	VP/VC 分段与路由重建	239
32.4	QoS 的保证与重新协商	241
32.5	信元的次序问题	242
32.6	越区切换的信令过程	242
32.7	结论	243
	参考文献	243

对 策 研 究

33	移动卫星通信系统的技术经济性能分析	245
33.1	引言	245
33.2	系统空间段的组成	246
33.3	全球系统业务量与每分钟通话成本估算	248
33.4	区域性系统的业务和每分钟成本估算	249
33.5	用户数和用户付费	250
33.6	一些实际系统收费标准、用户数和市场估计	251
33.7	2000 年的全球 LEO 系统能有几个?	252
33.8	我国移动卫星通信的设想	253
33.9	结论	253
	参考文献	253
34	发展我国中、低轨小卫星移动通信的策略研究	255
34.1	引言	255
34.2	国外卫星移动通信的发展状况	255
34.3	IMT-2000 卫星部分的 RTT 候选方案简介	256
34.4	我国卫星移动通信的发展现状和面临的选择	257
34.5	关于发展我国新一代区域性卫星移动通信的建议	258
34.6	我国新一代系统的前期工作和系统可能的扩展	258

34.7 结论	259
参考文献	259
35 建立我国综合卫星通信系统的设想	260
35.1 引言	260
35.2 国外卫星通信系统状况与技术发展趋势	260
35.3 我国卫星通信系统现状与未来需求的分析	262
35.4 建立我国的综合卫星通信系统的设想	262
35.5 综合系统的可行性和非同步轨道卫星星座	263
35.6 结论	264
参考文献	264
36 宽带卫星通信技术的现状与发展	265
36.1 引言	265
36.2 宽带卫星通信技术的现状	265
36.3 宽带卫星通信技术的发展趋势	266
36.4 结论	270
参考文献	270
缩略语	271

星座设计

1 中国的三种非同步轨道卫星移动通信系统星座方案

(吴诗其,胡剑浩,廖笠)

摘要

本文介绍基于我国的三种非同步轨道卫星移动通信系统星座方案:低、中轨系统各有 24 和 18 颗星,轨道高度分别为 1326km 和 8035km,两系统各以 5° 和 30° 的仰角对我国的覆盖率为 99.78% 和 99.96%;椭圆轨道系统 12 颗星,近、远地点分别为 427km 和 2906km,以 7° 和 15° 的仰角对我国北纬 20° 以上地区覆盖率分别为 97.90% 和 89.61%,若增加 4 颗中轨卫星,以 15° 仰角对我国的覆盖率为 99.99%。

1.1 引言

星座方案是卫星移动通信系统设计的重要课题,它直接关系到系统网络组成,链路传播特性,投资和服务方式与范围等几个重要方面。传统的同步轨道卫星通信系统,由于卫星轨道高、链路损耗大,因此对用户终端的有效全向辐射功率(EIRP)和接收机品质因数(增益/温度, G/T 值)的要求高。这种系统星座难于支持手持机直接通过卫星进行通信,或者需要采用 10m 以上的星载天线(L 波段)。同时,由于链路距离长、传播延时大,不利于移动台到移动台的双跳通信。

轨道高度较低的中、低轨系统,由于链路损耗小,降低了对用户终端 EIRP 和 G/T 值的要求,可支持手持机直接通过卫星进行通信。同时,短的传播延时允许移动台到移动台的两跳通信而不必采用星上交换处理。因此,非同步轨道的卫星移动通信系统受到广泛的重视,并得到迅速的发展。它势必成为全球个人通信网的重要传输手段之一。

本文首先介绍星座设计中的一些重要问题,然后分别讨论基于我国的卫星移动通信系统的低轨、椭圆轨道和中轨系统的星座方案。这里的“基于我国”,指星座覆盖率、仰角特性等,是以我国领土与海域为对象进行统计的。

1.2 星座设计中的几个重要问题

1.2.1 轨道类型与参数

卫星运行轨道有圆形和椭圆两类。椭圆轨道的倾角应为 63.4° , 以免轨道拱点的漂移。系统的卫星在远地点附近工作, 而近地点附近关闭不工作。因此, 椭圆轨道星座只能覆盖北半球或南半球, 且适用于高纬度地区。比如, 地处较高纬度的欧洲, 曾考虑过高椭圆轨道系统(远地点约 40000km)的 Archimedes 计划; 而瞄准美国(北纬 $25^\circ \sim 50^\circ$) 市场的 Ellipso 系统为低椭圆轨道系统(远地点约 3000km)。

非同步圆轨道系统以轨道高度不同而分为低、中轨两类。低轨系统轨道高度在 1000km 左右(600km 以下的卫星, 受大气阻尼、扰动以及氧原子对星体的影响较大; 而 1500 ~ 2500km 存在一条强的电磁辐射带, 即范·爱伦带, 应予避免)。如 Iridium 系统, 轨道高度为 776km; Globalstar 系统的轨道高度为 1389km。中轨系统的轨道高度约 10000km, 如 ICO。

根据开普勒定理, 卫星圆形轨道高度 h 与运行周期 T_S 的关系式为

$$h = \frac{T_S^{2/3} (GM)^{1/3}}{(2\pi)^{2/3}} - R_E \quad (1-1)$$

式中, 万有引力常数与地球质量的乘积 $GM = 3.986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$; 地球半径 $R_E = 6379.5 \text{ km}$ 。

1.2.2 星座中星群的分布

星座由若干轨道平面构成, 而且一般是均匀分布的, 即相邻轨道平面右升节点(轨道与赤道平面的交点, 且卫星由南向北通过该点)之间的相位差均相等。通常星座中各轨道平面上的卫星数目相等, 而同一轨道平面上的卫星是均匀分布的, 即相邻卫星之间的相位差相等。必须指出, 对于变速运行的椭圆轨道卫星, 卫星在轨道上是以“等时间间隔”排列的, 比如, 周期为 2h 的轨道上的 6 颗卫星, 将以 20min 的间隔排列, 即相邻卫星相距 20min 的路程。

星座内所需卫星的数目与一颗卫星所能覆盖的面积和系统应当覆盖的服务区总面积有关。一颗卫星的覆盖范围, 由卫星的高度和允许的最小仰角确定。

由于卫星的运行和地球的自转, 非同步轨道卫星不能固定地覆盖地面上的某一地区。当覆盖某地区的卫星即将飞逝时, 新的卫星已进入该地区上空。正确合理的星座设计, 星群应始终保持对整个服务区“均匀”地覆盖。极轨道系统卫星对地面形成的蜂窝状覆盖将随星群的运动而掠过地面, 而对于倾斜轨道系统, 星群形成对地面的蜂窝覆盖图案将随时变化。于是可能出现某些地区的重叠覆盖, 而另外一些地区不能覆盖的情况。如何保证倾斜轨道系统星群始终“均匀”地覆盖服务区, 将由轨道的倾角和相邻轨道卫星相位差的最佳化来解决。

本文提出的三种星座方案均采用倾斜轨道, 确定相邻轨道上卫星的最佳相位差是一个优化设计的问题。以星座对服务区的平均覆盖率最大化为目标进行设计是最适合的。然而, 平均覆盖率的统计工作量很大, 优化过程所费机时长。本文提出的星群最大离散化准则  将以相邻星下点(卫星和地心连线与地面的交点)之间的最小距离最大化为目标进行优化。应当指出, 椭圆轨道系统卫星的高度是变化的, 高度越高, 覆盖区域越大。因此, 椭圆轨道系

统中的星下点距离应当以相应的卫星高度来加权,高度越高,加权系数越大。

1.2.3 仰角、覆盖范围和系统裕量

一颗卫星的覆盖范围是以系统允许的最小仰角来定义的。仰角是在用户终端、星下点和卫星组成的平面内,以用户终端为顶点从地平线转到卫星的角度。显然,在卫星高度一定时,允许的最小仰角越小,卫星能覆盖的范围越大。然而,此时电波将在卫星与低仰角用户之间传播,容易受到地面障碍物的遮蔽和阻挡,使信号产生衰落,为此在系统的链路电平预算中,必须留有较大的裕量。

本文给出的基于我国的三种星座方案中,低轨卫星高度最低,椭圆轨道次之,而中轨卫星最高,它们的允许最小仰角分别取为 5° 、 15° 和 30° 。这是因为,当卫星高度较低时,在覆盖区的边缘难于获得较高的仰角,否则一颗卫星的覆盖范围将很小。而另一方面,虽然小仰角时电波传播的衰落而要求较大的系统裕量,然而由于链路短,传播损耗本身比较小,系统提供较大裕量并不存在特别的困难。而对传播损耗较大的中轨系统来说,允许最小仰角取较大的值,将有效地减小系统裕量。

1.2.4 覆盖特性统计

低、中轨系统实际上是全球系统,而椭圆轨道系统为(北或南)半球系统。由于星座方案是基于我国的,因此覆盖特性的统计是以我国的若干典型观察点进行的。分析与统计结果表明,同一纬度上的观察点的覆盖特性是相同的,所以虽然统计只得到针对我国的地区性结果,但在全球范围内具有普遍意义。覆盖特性是在星群运行过程中取样统计的。为了便于统计,使星座运行具有周期性是可取的,即星座的卫星在每隔若干天后的同一时刻,将出现在地球同一地点的上空。这种周期性星座也便于对卫星进行定位控制。

1.3 低轨系统星座方案

在考虑上节有关星座的诸多因素之后,我们拟定的基于中国的低轨系统星座由3个轨道平面构成,每个轨道平面上7或8颗卫星。为了使星群运行具有周期性,应由下式确定卫星运行周期 T_s

$$T_s = T_E \frac{k}{n} \quad (1-2)$$

式中, T_E 为地球自转周期,即一个恒星日, $T_E = 86164\text{s}$ 。 k 和 n 应选为整数。于是,地球自转 k 周后,卫星正好绕地球运行 n 圈,也就是说, k 天以后卫星绕地球 n 圈又回到当地上空。

在本文的方案中,取 $k = 5$;当 n 为64或65时,轨道高度分别为1326km和1247km。我国纬度范围在北纬 $4^\circ \sim 54^\circ$ 之间,按星群最大离散化准则优化的结果得到:轨道倾角为 42° ,而相邻轨道卫星之间的最佳相位差为 15° 。

在表1-1上列出了5种不同的星座方案,它们或者轨道高度不同,或者卫星数目不等,或者轨道倾角各异。可以看出:(1)轨道较高的方案A和B分别比较低轨道的方案D和E的覆盖率高;(2)卫星数较多的方案B和C,分别比卫星数少的A和D的覆盖率高;(3)轨道倾角为 45° 的方案C比 42° 倾角的方案B的覆盖率低。