

区域性中轨道卫星移动通信系统“时间决定”星座设计¹

胡剑浩 吴诗其 李乐民

(电子科技大学信息系统研究所 成都 610054)

摘 要 区域性卫星移动通信系统对于发展中国家具有十分重要的意义,特别是对于中国这样幅员辽阔且在广大农村地区缺乏基本通信手段的国家,采用中轨星座是解决这一问题的有效途径。本文提出了一种用于区域性系统的中轨星座设计方法:“时间决定”星座设计。该星座可为特定地区提供性能优越的服务,它提供的服务可以是时限的,也可以是非时限的。利用这种设计方法可以为中国设计经济的卫星移动通信系统星座方案,同时这些星座方案也可作为美国大陆提供优越的服务。

关键词 卫星移动通信,星座设计,区域性覆盖,时间决定

中图分类号 TN927.2, TN929.5

1 引 言

近年来,各种卫星移动通信系统方案纷纷问世,其中星座是这些系统的重要特征之一^[1]。星座设计是非同步卫星移动通信系统的关键技术之一^[2],星座方案对系统投资、系统结构、系统干扰、服务范围、服务质量以及信道的衰落特性等系统设计问题有很大的影响。因此星座设计在卫星移动通信系统中非常重要。

由于通信业务在世界范围和一个国家内分布的不均匀性,即 70% 以上的地球表面被业务需求很小的海洋所覆盖,且一个国家总的业务有 85% 以上是国内业务^[1];同时许多著名的星座设计方法^[3-6],如: Walker 星座、Rich 星座、Street coverage 星座和地面蜂房固定星座,大都用于全球均匀覆盖;这样势必造成卫星容量的巨大浪费。从政治和经济的角度出发,许多国家都希望建立自己卫星移动通信系统,这些系统应该是区域性系统。虽然同步卫星可以用于这类系统,但是较大的传播时延和传输损耗使得同步系统难以满足个人通信(PC)的要求。采用非同步区域性星座系统设计,其性能价格比较优,从而使星座设计成为这些系统的关键技术之一。

本文提出了时间决定星座(Time Dependent Constellation, TDC)方案,即根据卫星运行和地球自转之间的时间关系,调整能为服务区提供最长服务时间卫星间的相对相位关系,可用数目最少的卫星为特定服务区内的用户提供所需的服务要求。在 TDC 方案中我们采用 MEO(Medium Earth Orbit)卫星。首先,我们优化卫星参数以实现单颗卫星为服务区内的用户提供最长的服务时间;然后,调整卫星在星座中的相对相位,完成用最少的卫星数目为系统提供所需服务的要求。TDC 星座可以提供时限服务(Time Limited Service, TLS)和非时限服务(NonTime Limited Service, NTLS)。NTLS 可以在任何时间内为服务区内的用户提供服务;TLS 则是在有限的时间段内(例如:当地时间 6:30~22:30)为服务区内的用户提供服务。本文给出用于中国的 NTLS 和 TLS(6:30~22:30)TDC 星座方案,它们的卫星数目分别为 5 颗和 6 颗,轨道高度分别为 20525 和 10353km。这些星座方案不仅可以为中国提供性能优越的服务,而且可以用于美国,从而可进一步提高系统的利用率。

¹ 1998-07-15 收到, 1999-04-12 定稿
863 计划资助项目

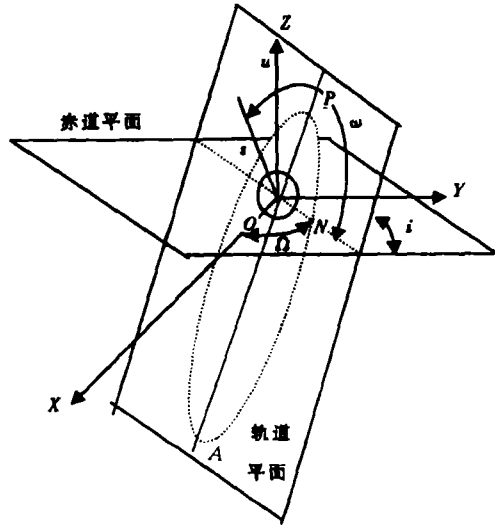


图1 轨道的空间关系

2 轨道的空间几何关系

进行星座设计应该首先了解轨道的空间几何关系,如图1所示,其中 v 是近真角, a 是半长轴(AP 的一半), e 是偏心率, ω 是近地点幅角, N 是右升节点, Ω 是右升节点的参考经线, i 是轨道平面倾角.参数组 $(a, e, v, \Omega, \omega, i)$ 被称为轨道参数,其中 (a, e, Ω, i) 决定轨道的形状,而 (v, ω) 决定卫星在轨道中的位置.卫星的地面轨迹是卫星星下点在地面上划过的轨迹,卫星的星下点的地理坐标(纬度 ϕ ,经度 λ)可以由下式得到

$$\phi = \sin^{-1}[\sin i \sin u], \quad (1)$$

$$\lambda = \tan^{-1}[\cos i \tan u] - (t - t_0)\Omega_E + \lambda_N, \quad (2)$$

式中 $u = \omega + v$, $v = \cos^{-1}(\cos E - e)/(1 - e \cos E)$, $E - e \sin E = M$, $M = 2\pi(t - t_0)/T_s$, t_0 是初始时刻, λ_N 是右升节点到参考经线的经度, T_s 是轨道周期, E 是偏近真角, M 是平均近真角, Ω_E 是地球自转的角速度.对于圆轨道上式可简化为 $u = \omega_0 + 2\pi(t - t_0)/T_s$,其中 ω_0 是卫星在轨道平面内的初始相位.

根据卫星星下点和移动用户的地理坐标,我们可以得到星座的一个重要指标,仰角特性,它们的关系式如下:

$$\cos(\theta + \beta) = \cos \beta / (1 + h_s/R_E), \quad (3)$$

$$\cos \theta = \cos \phi_{\text{sat}} \cos \phi_{\text{user}} - \sin \phi_{\text{sat}} \sin \phi_{\text{user}} \cos \lambda_{\text{sat-user}}, \quad (4)$$

其中 θ 是地心角, β 是仰角, h_s 是卫星的高度, R_E 是地球半径, ϕ_{sat} 是星下点的纬度, ϕ_{user} 是移动用户的纬度, $\lambda_{\text{sat-user}}$ 是卫星星下点与移动用户之间经度差的绝对值.

根据这些轨道的空间几何关系我们可以推出星座的优化算法.

3 “时间决定”星座设计

区域性星座和全球星座的区别在于,区域性星座不必考虑对服务目标区以外地区进行覆盖。虽然非静止轨道卫星与地球间不能保证相对固定的位置关系,但是由于 MEO 卫星的高度较 LEO(Low Earth Orbit) 卫星更高一些,因而与 LEO 卫星相比 MEO 卫星的覆盖范围更广,覆盖时间更长;另一方面, MEO 星座较椭圆轨道星座能够为设计提供更大的方便^[8]。因此我们在 TDC 中采用 MEO 卫星。

根据卫星和地球运行的时间关系,我们调节能够为目标区提供最长覆盖时间的各卫星在星座的相对关系,可使为目标区在所需要的时段提供服务的卫星数目最少。这种星座被称为“时间决定”星座(TDC)。首先,我们通过优化卫星参数(Ω^* , ω^* , i^*)来获得对服务目标区最长的单星服务时间;然后, TDC 星座中的卫星数目可以通过对卫星的相对相位进行优化得到;最后,我们便得到服务于特定目标区的 TDC 星座。

在本文中,服务目标区抽象为地球表面上的圆以简化推导。例如,中国被抽象成为一个圆心位于北纬 30° 东经 105° 地心角为 26° 的圆。

3.1 卫星参数的优化设计

在 TDC 中,卫星的运行周期和地球的自转周期必须保持整数关系,这样才能使得星座对服务目标区保持稳定的覆盖特性。

$$T_E = nT_s, \quad (5)$$

其中 T_E 为地球的自转周期, T_s 为卫星的运行周期。

根据开普勒定理,圆轨道卫星的运行周期是由卫星高度决定的:

$$T_s = 2\pi[(h_s + R_E)^3/\mu]^{1/2}, \quad (6)$$

其中 $\mu = 3.986 \times 10^{14} \text{m}^3\text{s}^{-2}$ 。

可以证明,卫星每天可为服务目标区提供 $m = \text{int}[n/2]$ 次覆盖,且通过调节卫星参数可使每次覆盖的时间基本相同,这样便为 TDC 星座设计提供了方便。在这部分讨论的覆盖是以单星为整个目标覆盖区提供服务,而卫星之间的协同服务将在后面的部分进行讨论。

卫星对目标区服务的总时间是卫星参数($\Delta\Omega$, ω , i)的函数,其中 $\Delta\Omega$ 是目标区中心与右升节点之间经度之差的绝对值。最优化的卫星参数(Ω^* , ω^* , i^*)可以通过经典的优化算法获得。

3.2 星座的优化设计

即使卫星的运行周期为 6h 或 12h,卫星对服务目标区的总服务时间与地球自转周期或所要求的服务时间相比是非常有限的。因而卫星间的相互合作对达到所需卫星数目最少的设计目标是十分重要的。在 TDC 星座中采用的是相位星座,它的优化原则是:(1)采用配合良好的卫星星座为服务目标区在所需的时间内提供连续的覆盖。(2)以单星在没有卫星合作的条件下实现最长的服务时间,以达到星座所需的卫星数目最少。

卫星合作是指,当一颗卫星不能以最小设计仰角覆盖整个目标区时,有另一颗卫星为前者所不能覆盖的地区提供服务。这样星座便可以为目标区提供连续覆盖。卫星之间的合作情况如图 2 所示。s1 在初始时刻(t_0)开始为整个目标区提供覆盖,其优化的卫星参数为(Ω^* , ω^* , i^*)。s2 是 s1 的后继卫星,它的参数由 s1 的参数和 s1 与 s2 初始时刻之差 Δt 来决定。这些参数可以通过下面的关系式获得。

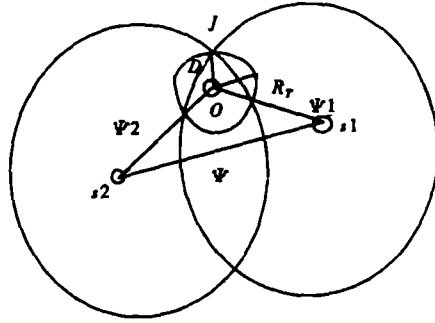


图2 卫星间的合作情况

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= i^*, \\ \Omega_2 &= \Omega^* - \Delta t \Omega_E, \\ \omega_2 &= \omega^* + \Delta t 2\pi / T_s. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据球面三角的关系, 我们可以得到交点 J 和目标区中心 O 之间的距离 D :

$$D = \left\{ \theta^2 + \Psi_2^2 - 2\theta\Psi_2 \cos \left[\cos^{-1} \frac{\Psi}{2\theta\Psi} - \cos^{-1} \frac{\Psi^2 + \Psi_2^2 - \Psi_1^2}{2\Psi_1\Psi_2} \right] \right\}^{1/2} \quad (8)$$

其中 $\Psi = \cos^{-1}[\cos \phi_{s1} \cos \phi_{s2} - \sin \phi_{s1} \sin \phi_{s2} \cos \Delta \lambda_{s1-s2}]$, $\Psi_1 = \cos^{-1}[\cos \phi_{s1} \cos \phi_o - \sin \phi_{s1} \sin \phi_o \cos \Delta \lambda_{s1-o}]$, $\Psi_2 = \cos^{-1}[\cos \phi_{s2} \cos \phi_o - \sin \phi_{s2} \sin \phi_o \cos \Delta \lambda_{s2-o}]$, $\cos(\theta + \beta_{\min}) = \cos(\beta_{\min}) / (1 + h_s / R_E)$, $\Delta \lambda_{s1-s2} = |\lambda_{s1} - \lambda_{s2}|$, $\Delta \lambda_{s1-o} = |\lambda_{s1} - \lambda_o|$, $\Delta \lambda_{s2-o} = |\lambda_{s2} - \lambda_o|$, β_{\min} 是最小设计仰角; ϕ_{s1} , ϕ_{s2} 和 ϕ_o 分别是 $s1$, $s2$ 和 O 的纬度; λ_{s1} , λ_{s2} 和 λ_o 分别是 $s1$, $s2$ 和 O 的经度。为了实现连续覆盖, 当交点 J 位于图的上部时, D_{up} 应该满足

$$D_{\text{up}} \geq R_T. \quad (9)$$

其中 R_T 是目标区的地心角。

类似地, 我们也可以获得交点 J 位于图下部的角距离 D_{dwon} , 它也要满足

$$D_{\text{dwon}} \geq R_T, \quad (10)$$

利用经典优化算法, 我们可以得到满足 (7)–(10) 式 Δt 的最大值, Δt^* 。

若要在时间间隔 $[t_0, T]$, 实现对目标区的连续覆盖, 星座所需的最少卫星数目为

$$N = \text{int} \left\{ \frac{T - t_0}{\Delta t^* m} \right\}. \quad (11)$$

TDC 星座中的参数为

$$\left. \begin{aligned} i_k &= i^*, \\ \omega_k &= \omega^* + \Delta t^* 2k\pi / T_s, \\ \Omega_k &= \Omega^* - \Delta t^* k\Omega_E, \end{aligned} \right\} \quad k = 2, 3, \dots, N. \quad (12)$$

3.3 扰动分析

在实际情况下,月球和太阳对卫星的运行有影响;此外地球重力场的不对称性对卫星也有影响,这些因素合成为一种长周期的扰动.对MEO的主要影响是由于地球的不对称造成的 Ω 长期漂移,它可以表示为

$$d\Omega/dt = -(3/2)n_0AJ_2 \cos i, \quad (13)$$

其中 $A = R_E^2/(h_s + R_E)^2$, $n_0 = 2\pi/T_s$, $J_2 = 1.083 \times 10^{-3}$.

Ω 漂移的影响使卫星的右升节点随着时间向西移动.我们可以通过稍微增加卫星的运行周期来克服这种扰动的影响.

4 用于中国的星座方案

4.1 TLS 星座方案

实际情况中,电信业务的分布在时间上是不均匀的,一天中业务量的大部分集中在有限的时段内,如图3所示^[9].因此时限星座方案(TLS)可以用更少的卫星来为这大部分的业务服务.我们采用TDC设计了用于中国的TLS星座方案,该星座具有6个轨道平面,每个轨道平面上的一颗卫星.该星座可以从上午6时到晚上10时30分为中国提供连续的覆盖.该星座方案的参数列于表1,它的覆盖性能如图4所示.从图中可以看出该星座具有较好的覆盖性能.由于中国和美国地理上的对称性,该星座也可以为美国提供同样的服务.

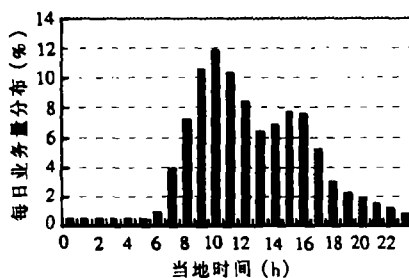
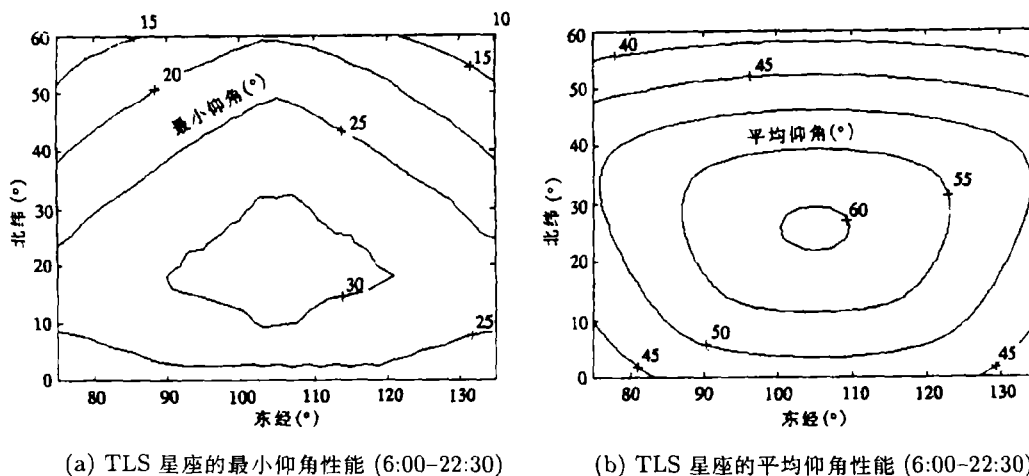


图3 业务量随时间的变化情况



(a) TLS星座的最小仰角性能(6:00-22:30)

(b) TLS星座的平均仰角性能(6:00-22:30)

图4

4.2 NTLS 星座方案

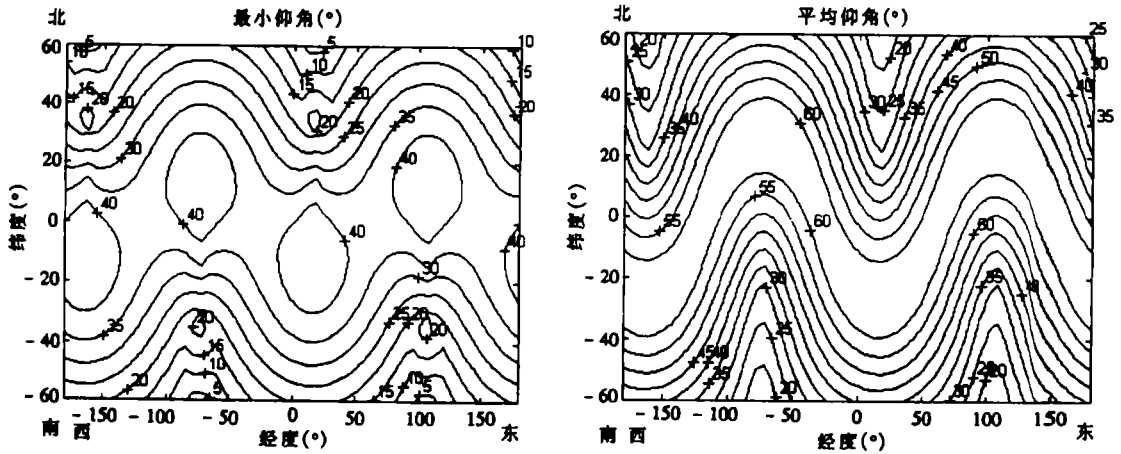
从用户的角度出发, 一个完整的系统应该为服务区提供非时限的服务, TDC 可以用于设计 NTLS 区域性星座方案。用于中国的 NTLS 星座参数列于表 2。该星座具有 5 个轨道平面, 每个轨道一颗卫星。该星座对中国的覆盖特性十分优越, 如图 5 所示。该星座还可被美国和非洲使用。

表 1 TLS 星座方案参数

卫星	高度 (km)	倾角 (°)	λ_N (°)	ω (°)
1	10535	42	180	270
2	10535	42	205	172
3	10535	42	230	74
4	10535	42	255	336
5	10535	42	280	238
6	10535	42	305	140

表 2 NTLS 星座方案参数

卫星	高度 (km)	倾角 (°)	λ_N (°)	ω (°)
1	20525	31	180	93
2	20525	31	108	237
3	20525	31	36	21
4	20525	31	324	165
5	20525	31	252	309



(a) NTLS 星座的最小仰角性能

(b) NTLS 星座的平均仰角性能

图 5

5 结 论

仿真结果表明, 利用卫星运行与地球自转的时间关系有利于用更少的卫星来为区域性系统服务。正是利用了这一关系的“时间决定”星座设计方法可以为区域性卫星移动通信系统设计提供经济有效的手段。

参 考 文 献

- [1] Wu Shiqi, *et al.* The new development of mobile satellite communication technology. *Telecommunication Information*, 1996, 24(2): 2-6.
- [2] Hu Jianhao, *et al.* A study of several coherent problems for constellation design of mobile satellite communication system. SCRS'97, Xian, China: 1997, 104-110.
- [3] 胡剑浩, 吴诗其, 冯钢. 中国低轨移动卫星通信系统星座设计. *电子学报*, 1996, 24(7): 12-16.
- [4] Restrepo J, Maral G. Constellation for non-GEO 'earth-fixed cell' satellite systems. AIAA-96-1077-CP, 1996: 768-778.
- [5] Rider L. Optimized polar orbit constellation for redundant earth coverage. *the Journal of the Astronautical Sciences*, 1988, 33(2): 147-161.
- [6] Adams W S, Hopkins R G. Minimal arbitrarily phased constellations with a given inclination providing single global coverage. AAS 91-508, 1991, 1419-1429.
- [7] Bousquet M, Maral B. Orbital aspects and useful relations from earth satellite geometry in the frame of future mobile system. AIAA-1990, 1990, 783-789.
- [8] Drain J E, Castiel D. Elliptic constellations for optimal coverage of selected geographical areas. AIAA-96-1075-CP, 1996, 749-761.
- [9] Gumbert C C, Violet M D. Assessing mobile satellite systems using a cost per billable minute metric. AIAA-96-CP, 1996, 888-899.

TIME-DEPENDENT CONSTELLATION DESIGN FOR
REGIONAL MOBILE SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Hu Jianhao Wu Shiji Li Lemin

(Institute of Information and Systems of UESTC, Chengdu 610054)

Abstract Regional mobile satellite communication systems are very important for developing countries, especially for China that lacks the basic communication methods in her large rural areas. Adopting Medium Earth Orbit (MEO) constellation is an effective way for this situation. Time-dependent constellation for the regional mobile satellite communication systems is proposed in this paper. The constellation can provide excellent coverage performance for special territory, and the system service provided by the constellation can be time-limited and non-time-limited. The constellation schemes (time-limited and non-time-limited) of the economical mobile satellite communication system for China designed with this method are proposed in this paper, and they also can provide excellent service for United States.

Key words Mobile satellite communication system, Constellation design, Regional coverage, Time dependent

胡剑浩: 男, 1971年生, 博士生, 从事卫星移动通信技术研究.

吴诗其: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 主要从事个人通信和卫星通信技术研究.

李乐民: 男, 1936年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事通信网、宽带光纤通信、ATM技术等领域的研究工作.