

区域覆盖共地面轨迹星座的优化设计

吴廷勇 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 该文讨论了使用中轨共地面轨迹星座建立区域覆盖卫星通信系统的优化设计方法。在深入研究共地面轨迹星座参数特性的基础上,提出了一种能够完整描述该类型星座的编码标识方法,推导了星座与 δ 星座的等价关系,讨论了利用该类型星座实现区域覆盖时的优化方法,给出了适用于我国的多个优化星座方案实例。从仿真结果可以看出,该类型星座能够以较少数量的卫星为我国提供良好的覆盖性能,适于我国的区域覆盖卫星通信系统采用。

关键词 卫星通信, 共地面轨迹星座, 区域覆盖, δ 星座

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1360-04

The Design of Optimized Common-Track Constellation for Regional Coverage

Wu Ting-yong Wu Shi-qi

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

Abstract An optimization design method for implementing regional coverage satellite system with common-track constellation is proposed. Based on a thorough investigation on the parametric characteristics of the common-track constellation, a coded notation which can describe this type of constellation entirely is proposed and the restricted equivalent relationship to the Walker's δ constellation is given. The optimized method of common-track constellation for regional coverage is studied, and some optimal constellation schemes for China are presented. The simulation results show that the optimized common-track constellation can provide favorable coverage performance to China area with fewer satellites. The designed constellations are appropriate for the regional coverage satellite system of China.

Key words Satellite communication, Common-track constellation, Regional coverage, δ constellation

1 引言

目前,世界上许多国家都希望建立自己的区域覆盖卫星通信系统。区域覆盖卫星系统的实现既可以采用1到2颗静止轨道卫星(如ACeS系统),也可以采用数量较多的非静止轨道卫星星座。采用静止轨道卫星实现区域覆盖卫星通信系统存在以下的一些缺点:首先,卫星的轨道太高,传输损耗太大,不利于支持小型化手持终端;其次,卫星的 0° 纬度特性使得系统对中高纬度地区的仰角较小,覆盖特性不理想;第三,静止轨道轨道资源非常紧张,较难获得。因此,越来越多的注意力转向了实现非静止轨道的区域覆盖卫星通信系统。

利用多个倾斜轨道面上的多颗具有确定空间相位关系的卫星群组成的卫星星座,可以实现对全球或特定区域的无缝覆盖。在进行星座设计时,常采用的星座类型有Walker的 δ 星座^[1]、Rider的优化极轨道星座^[2]、赤道轨道星座和共地面轨迹星座。玫瑰星座的卫星具有在空域面上较均匀分布的特性,较适合于实现全球覆盖卫星通信系统,如Globastar系统;优化极轨道星座的卫星具有在赤道密度小而两极密度大的特点,可以实现全球覆盖或极冠覆盖的卫星通信系统,如Iridium系统;赤道轨道星座中所有的卫星位于赤道平面上,

因此该类型星座能够为低纬度地区提供较好的覆盖,适合于覆盖低纬度地区的地带性覆盖系统;共地面轨迹星座是一种特殊类型的星座形式,星座中所有卫星沿不变的地面轨迹运行,星座对指定区域的覆盖更加紧凑^[3],比较适合于实现区域覆盖。 δ 星座和优化极轨道星座都有一套成熟而完整的优化设计方法,而共地面轨迹星座到目前尚没有见到较完整的设计方法。

本文深入地研究了共地面轨迹星座的特性,提出了一种简约的星座参数编码标识方法,给出了该类型星座实现区域覆盖卫星系统时的通用优化设计方法,基于该方案给出了适用于我国的多个星座方案实例。

本文的第2节分析了共地面轨迹星座的特性;第3节讨论了星座实现区域覆盖时的优化准则与方法;第4节给出了以我国为目标区域实现的优化区域覆盖星座实例;第5节是结束语。

2 共地面轨迹星座的特性

2.1 轨道参数的约束条件

共地面轨迹星座由多个轨道高度和倾角相同轨道面组成,每个轨道面内只有一颗卫星,利用地球的自转特性和合理设计的轨道面间的升交点经度差以及不同轨道面内卫星间的相位差,使得不同轨道面内的多颗卫星沿相同的地面轨

迹运行, 因而称为共地面轨迹星座。图1所示为两个轨道面内两颗卫星的空间几何关系。图中, λ_i 和 λ_j 分别是卫星*i*和*j*所在轨道面的升交点经度, 两轨道面间的经度差 $\Delta\lambda = |\lambda_i - \lambda_j|$; $\Delta\omega$ 是卫星*j*滞后于卫星*i*的相位; 地球以角速度 ω_e 绕地轴由西向东旋转。由图可见, 如果卫星*j*从当前位置运行到其升交点 λ_j 用去的时间和地球自转 $\Delta\lambda$ 用去的时间相同, 则卫星*j*和卫星*i*具有相同的星下点轨迹。据此可以推导共地面轨迹星座中相邻轨道面卫星应满足的条件:

$$\Delta\lambda / \omega_e = \Delta\omega / \omega_s \quad (1)$$

式中 $\Delta\lambda$ 是相邻轨道面的升交点经度差; ω_e 是地球自转角速度; $\Delta\omega$ 是相邻轨道面中卫星间的相位差; ω_s 是卫星在轨的角速度, 由卫星的轨道高度*h*决定。

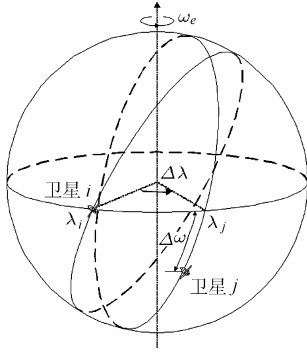


图1 两个轨道面内两颗卫星的空间几何关系

Fig.1 Geometry of a satellite pair

由于地球的自转特性, 即使多个轨道面的卫星具有了相同的地面轨迹, 地面轨迹也可能在地球表面上移动。为维持地面轨迹的不变性, 共地面轨迹星座通常采用回归或准回归轨道, 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。

回归/准回归轨道是卫星星下点轨迹在*M*个恒星日, 围绕地球旋转*L*圈后重复的轨道(*M*和*L*都是整数)。如果*M*=1, 称为回归轨道, 其轨道周期为 $1/L$ 个恒星日; 如果*M*>1, 称为准回归轨道, 其轨道周期为 M/L 个恒星日。回归/准回归轨道的周期 T_s 可通过下式确定:

$$T_s = T_e M / L \quad (2)$$

式中 $T_e = 86164$ s, 为1个恒星日。由式(2)可以得到采用回归/准回归轨道卫星的在轨角速度 ω_s 与地球自转的角速度 ω_e 之间满足关系式:

$$\omega_s = \omega_e L / M \quad (3)$$

将式(3)代入式(1), 得

$$\Delta\omega = \Delta\lambda L / M \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 在采用回归/准回归轨道的共地面轨迹星座中, 相邻轨道面间的升交点经度差 $\Delta\lambda$ 和相邻卫星间的相位差 $\Delta\omega$ 满足简单的线性关系。在确定了卫星的轨道高度之后, 便可以通过式(4)确定各相邻轨道面间的升交点经度差和相邻卫星间的相位差。

必须指出, 图1中所示的卫星间相位差 $\Delta\omega$ 与Walker的 δ 星座中所定义的卫星间相位差 $\Delta\omega_f$ 不同。本文中, $\Delta\omega$ 是从轨

道升交点处逆卫星运行方向测量的, 而 $\Delta\omega_f$ 则是从轨道升交点处顺卫星运行方向测量的, 因此它们之间满足 2π 互补关系, 即

$$\Delta\omega_f = 2\pi - \Delta\omega \quad (5)$$

2.2 共地面轨迹星座的编码标识方法

根据共地面轨迹星座中各参数的对应关系, 可以借鉴Walker对 δ 星座的标识方法^[1], 将共地面轨迹星座的各参数标识为

$$N / \Delta\lambda / (L / M) : i \text{ 或 } N / \Delta\lambda / L : i$$

前一种标识为通用形式, 后一种标识则适用于星座采用回归轨道(*M*=1)的特殊情况。其中: *N*为星座中卫星数量, 亦即轨道面数量; $\Delta\lambda$ 为星座中相邻轨道面间的升交点经度差; (*L*/*M*)称为调相因子, 确定了相邻轨道面相邻卫星间的相位差 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\omega_f$, 以及卫星轨道高度*h*; *i*为星座中所有轨道面的倾角。根据开普勒第3定理, 卫星高度可由下式确定:

$$h = (M / L)^{2/3} (R_e + h_{\text{GEO}}) - R_e \quad (6)$$

式中 R_e 为地球的平均半径; $h_{\text{GEO}} = 35786$ km, 为静止轨道卫星高度。

根据上述的星座标识可以确定星座中所有卫星的轨道参数。按此方法可以将文献[4]中的6星方案紧凑地表示为6/60/2:28.5°, 将文献[5]中的9星方案表示为9/30/4:50°。

文献[4]中, 星座各轨道面的升交点在赤道上的分布是不均匀的, 因此瞬时星下点在地面轨迹上的相位间隔是非均匀的; 而文献[5]中星座各轨道面的升交点在赤道上的分布是均匀的, 因此瞬时星下点在地面轨迹上的相位间隔也是均匀的, 实际上该星座与 δ 星座6/6/4:28.5°是等价的。可见, 共地面轨迹星座与 δ 星座存在一定的等价关系, 接下来便推导它们等价时的约束条件。

2.3 共地面轨迹星座与 δ 星座的等价关系

Walker的 δ 星座的标识为: $T/P/F^{[1]}$ 。其中*T*为星座中卫星总数量, *P*为轨道平面数, *F*为相位因子(取0~*P*-1间的整数), 用于确定相邻轨道相邻卫星间的相位差 $\Delta\omega_f$ 。

δ 星座中相邻轨道面的经度差和相邻轨道面相邻卫星的相位差分别为

$$\Delta\lambda = 2\pi / P \quad (7)$$

$$\Delta\omega_f = 2\pi F / T \quad (8)$$

要使得 δ 星座与共地面轨迹星座等价, 则首先要满足 $T = P$, 即每轨道面一颗卫星的情况, 另外必须选择合适的相位因子*F*, 使得轨道面间经度差和相邻卫星的相位差满足式(1)。将式(5)、式(7)和式(8)代入到式(1)中, 可得约束关系式:

$$T - F = \omega_s / \omega_e \quad (9)$$

由式(9)可知, 由于*T*和*F*均是整数, 因此等式成立时, ω_s 必然是 ω_e 的整数倍数。因此, δ 星座与共地面轨迹星座等价时, 必然采用回归轨道(*M*=1)。再根据式(3), 可以确定*T*, *F*和*L*之间满足关系式:

$$F = T - L \quad (L = 1 \sim T) \quad (10)$$

因此, δ 星座 $T/T/(T-L)$ 与共地面轨迹星座 $T/(2\pi/T)/L$ 是

等价的。文献[5]中的星座方案既是 δ 星座 6/6/4:28.5°, 也是共地面轨迹星座 6/60/2:28.5°。

3 共地面轨迹星座实现区域覆盖

共地面轨迹星座比较适合于实现区域覆盖的原因如下:

(1)星座中所有卫星沿不变的地面轨迹运行, 卫星之间的相位差也不一定是均匀的, 因此星座中卫星可以在特定的区域相对集中; (2)由于采用了回归或准回归轨道, 卫星总是在相同时间通过相同地面区域上空, 因此便于特定区域内的少数信关站实现对星座的测控和维护。本节讨论共地面轨迹星座实现区域覆盖时的轨道参数选择策略和进行星座参数优化时采用的准则与方法。

3.1 轨道参数的选择

根据共地面轨迹星座中各参数间的制约关系, 可知要确定一个共地面轨迹星座, 需确定的参数包括: (1)轨道高度、(2)轨道倾角、(3)卫星数量(即轨道面数量)、(4)星座第一个轨道面的升交点经度和(5)轨道面间的升交点经度差 $\Delta\lambda$ (即卫星间相位差 $\Delta\omega$)。

根据文献[4]的分析可知, 在实现区域性非静止轨道卫星通信系统时, 宜采用中轨星座而不宜采用低轨星座。共地面轨迹星座可以使用回归或准回归轨道。对区域性覆盖星座, 为简化系统管理和控制, 在设计时更倾向于选择使用回归轨道。中轨回归轨道可选用的轨道高度为 20184km, 13892km, 10355km 和 8042km, 它们在一个恒星日内绕地球旋转的圈数分别为 2, 3, 4 和 5。

在给定了目标覆盖区和轨道高度后, 可以采用文献[4]中给出的方法估算所需的最少卫星数量。

星座第 1 个轨道面的升交点经度确定了星座地面轨迹与覆盖区域间的位置关系, 需根据给定的覆盖区域进行优化选取。选取策略为: 当星座的地面轨迹没有交点时, 应使得地面轨迹的最高点位于覆盖区的中心经度上; 当地面轨迹有交点时, 应使得具有最高纬度值的交点位于覆盖区的中心经度上。

根据选定的轨道高度, 可以通过本文式(3)确定 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\omega$ 之间的单值映射关系, 因此这两个可变参数实际上等效为 1 个。

综上可知, 在确定了覆盖区域, 选定了轨道高度和卫星数量后, 只留下可变参数组($\Delta\lambda, i$), 通过仿真可以确定优化的星座参数。

3.2 星座参数优化准则和方法

最常用的比较星座覆盖性能的指标是对目标区域的覆盖率特性。在 10° 仰角限制下, 多种参数组合下的中轨共地面轨迹星座都能够实现对我国区域的单重连续覆盖, 而双重覆盖性能都较差, 所以仅从覆盖率特性上无法区别各星座的性能差异。

本文在星座参数优化时采用的准则为: 在满足单重覆盖率达到 100%的条件下, 使得对中国的区域平均最佳仰角最

大化。

由于地面样点可能在瞬时“看见”多颗卫星, 因此将瞬时地面样点对星座中卫星仰角的最大值称为该样点的瞬时最佳仰角, 将地面样点瞬时最佳仰角的时间平均称为该样点的平均最佳仰角, 而将所有地面样点的平均最佳仰角的统计平均称为星座对覆盖区的区域平均最佳仰角。该参数反映了星座对指定覆盖区域的整体覆盖性能, 显然, 区域平均最佳仰角越大, 星座对覆盖区的整体覆盖性能越好。

根据上述的星座参数的选取策略和优化准则, 区域覆盖共地面轨迹星座参数的搜索优化过程为:

(1) 选择星座轨道高度和卫星数量;

(2) 对给定的当前参数组($\Delta\lambda, i$), 计算对覆盖区域的统计覆盖率 η_{SPACE} :

(3) 如果 $\eta_{\text{SPACE}}=100\%$ 继续, 否则跳到步骤(5);

(4) 计算区域平均最佳仰角, 和前面最优参数组的计算结果进行比较, 更新当前的最优参数组并记录;

(5) 如果所有参数组都计算完成, 给出最优参数组和计算结果, 结束; 否则更改参数组, 重复执行步骤(2)。

4 适用于我国的优化共地面轨迹星座

4.1 覆盖区域和仿真参数设置

本文将中国限定在东经 73°~135°, 北纬 4°~54°的范围内, 中心位置为东经 104°、北纬 29°, 其范围包括了中国大陆、领海和部分周边地区。按 3.1 节中的方法, 对于高度为 20184km, 13892km, 10355km 和 8042km 的共地面轨迹星座, 可以确定最佳的第 1 个轨道面升交点经度分别为东经 59°, 104°, 81.5°和 68°。

仿真参数的设置如下:

(1) 总仿真时间 1 个太阳日(86400 s), 时间步长为 1 min, 总的时间样点数 1440;

(2) 地面样点采用相同的经纬度分辨率, 均为 0.5°。经度上取点 125 个, 纬度上取点 101 个, 总样点数 12625 个。

4.2 优化共地面轨迹星座

通过仿真计算, 确定卫星数量从 4 到 13 时, 适用于我国的优化中轨共地面轨迹星座方案的参数如表 1。

从表 1 可以看出, 除 4 星星星座方案外, 其余星座对我国区域的整体覆盖性能都很好, 区域平均最佳仰角均在 50°以上。

另外, 通过对表 1 中仿真数据的分析, 还可得到如下结论:

(1) 星座的轨道越高, 增加 1 颗卫星带来的覆盖性能改善越明显。如表 1 中, 星座轨道高度为 20184km 时, 增加 1 颗卫星使得区域平均最佳仰角增加约 10°, 而在高度为 8042km 时, 增量仅约 1°。

(2) 在轨道高度不变的情况下, 随着卫星数量的增加, 优化星座的倾角也随之增加, 使得星座中卫星在地面轨迹交点附近的距离减小, 改善覆盖性能。如表 1 中, 星座轨道高度为 20184km 时, 4 星星星座的倾角为 11°, 而 5 星星星座的倾角为 33°。

表 1 我国的优化共地面轨迹星座参数
Tab.1 The parameters of optimized common-track constellations for China

N	L	h (km)	轨道升交点经度($^{\circ}$)	i ($^{\circ}$)	$\Delta\lambda$ ($^{\circ}$)	区域平均最佳仰角($^{\circ}$)
4	2	20184	59	11	90	46.7152
5	2	20184	59	33	72	56.8664
6	3	13892	104	59	36	51.1793
7	3	13892	104	61	30	54.8465
8	3	13892	104	63	26	57.4913
9	4	10355	81.5	48	29	50.9271
10	4	10355	81.5	48	25	54.3554
11	5	8042	68	41	33	52.3173
12	5	8042	68	41	66	53.1044
13	5	8042	68	42	32	54.2766

(3) 大多数情况下, 为改善对特定区域的覆盖性能, 星座中的卫星在地面轨迹上的分布是不均匀的。如表 1 中, 除轨道高度为 20184km 的星座外, 其余各星座中, 各轨道面的升交点经度在赤道上的分布都是不均匀的, 因此卫星在地面轨迹上的分布也是不均匀的。

值得指出, 轨道高度为 10355km 时, 8 颗卫星构成的星座也可以实现对我国的连续覆盖, 但倾角很低, 最大值为 3° , 且卫星在地面轨迹上均匀分布, 所以该星座几乎等价于赤道轨道星座, 因而在表 1 中给出。

4.3 优化共地面轨迹星座的覆盖特性

由于星座方案较多, 限于篇幅, 本文不能给出所有星座的覆盖特性; 再考虑到 20184km 轨道的高度较高而不易于支持区域移动通信, 于是选择其余轨道高度下区域平均最佳仰角最大和最小的 8 星和 9 星优化星座作为例子。

4.3.1 平均最佳仰角覆盖图 8 星和 9 星优化星座的平均最佳仰角覆盖特性分别如图 2 和图 3。图中给出了平均最佳仰角的等值线分布情况。

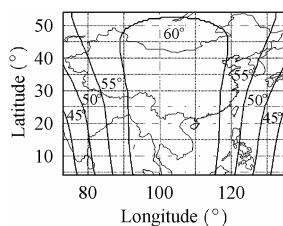


图 2 8 星优化星座的平均最佳仰角

Fig.2 The contour plot of mean optimum elevation for 8-satellite optimized constellation of China

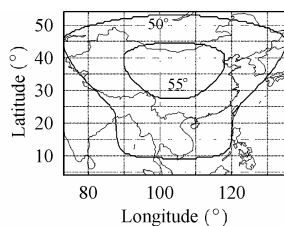


图 3 9 星优化星座的平均最佳仰角

Fig.3 The contour plot of mean optimum elevation for 9-satellite optimized constellation of China

由图 2 和图 3 可以看出, 8 星星星座对整个区域的平均最佳仰角均超过 50° , 绝大部分区域超过 55° , 超过一半区域的平均覆盖仰角超过 60° ; 9 星星星座对我国绝大部分地区的平均最佳仰角均超过 50° , 在中北部地区超过 55° 。显然, 各优化共地面轨迹星座对我国的覆盖特性良好, 可以作为我国自己的区域卫星通信系统方案。

4.3.2 最小最佳仰角覆盖图 最小最佳仰角即地面样点瞬时

最佳仰角的最小值, 反映了星座对该样点覆盖的最差情况。8 星和 9 星优化星座的最小最佳仰角覆盖特性分别如图 4 和图 5。图中给出了最小最佳仰角的等值线分布情况。

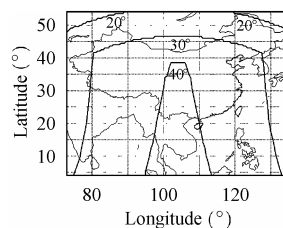


图 4 8 星优化星座的最小最佳仰角

Fig.4 The contour plot of minimum optimum elevation for 8-satellite optimized constellation of China

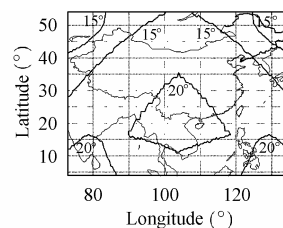


图 5 9 星优化星座的最小最佳仰角

Fig.5 The contour plot of minimum optimum elevation for 9-satellite optimized constellation of China

由图 4 和图 5 可以看出, 8 星星星座对我国绝大部分区域的最小最佳仰角均超过 20° , 大部分区域超过 30° , 少部分区域超过 40° ; 9 星星星座对我国大部分地区的平均最佳仰角高于 15° (除西北和东北部分区域), 对西南地区的最小最佳仰角高于 20° 。在各优化共地面轨迹星座中, 由于各地面样点的平均最佳仰角值都较高, 因此可以判定各点的最小最佳仰角值出现的时间很少, 且几乎都高于 15° , 再一次说明了星座方案对我国区域的覆盖性能是良好的。

5 结束语

共地面轨迹星座中卫星沿相同地面轨迹运行的特点使得该星座特别适用于实现区域覆盖的卫星通信系统。本文分析了共地面轨迹星座的特性, 讨论了以该类型星座实现区域覆盖卫星通信系统的优化设计方法, 给出了卫星数量从 4 到 13 时的优化星座方案以及其覆盖特性。仿真分析结果表明, 该类型的星座可以以较少数量的中轨卫星为我国及周边地区提供良好的覆盖特性, 适于作为我国区域卫星通信系统方案。另外, 本文的设计方法具备一般性, 可以用于设计针对其它地区的区域覆盖卫星系统。

参考文献

- [1] Walker J G. Satellite constellations. *Journal of the British Interplanetary Society*, 1984, 37: 559-572.
- [2] Rider L. Optimized polar constellation for redundant earth coverage. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1985, 33(2): 147-161.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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。

吴诗其: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星通信和个人通信。

