

区域多重覆盖 Walker 星座

袁福寅 陆镇麟

(北京系统工程研究所, 100101)

摘 要

本文提出一种新的卫星星座优化方法,得出最优的区域覆盖星座,并给出了应用实例。

关键词 卫星星座,多重覆盖,区域覆盖,优化

一、引 言

近几年来,世界上不同的国家和组织纷纷推出采用中、低轨道(MEO/LEO)多卫星群的全球通信或导航系统,改变了以往传统上依赖地球同步轨道(GEO)卫星实现对地服务的局面。

发展多卫星系统的一个重要技术是卫星星座的优化设计,它对系统的服务性能和建设成本有着直接的影响。卫星星座的优化设计工作始于六十年代初^[1],至今已取得了很多进展。对全球连续覆盖而言,已有了若干种成熟的优化设计方法,如极轨相位调优星座设计方法^[2]和 Walker 星座的三角形算法^[3]等。

尽管如此,星座设计仍有许多问题值得研究。除全球覆盖外,还有两类区域覆盖。一类是对地球极帽的覆盖(即对某纬度以上地区的连续覆盖),Luder^[1]和 Beste^[4]在这方面进行了深入的研究。另一类是对纬度带的覆盖(即对南、北某纬度以内地区的连续覆盖),尽管有人^[5]对此作过定性的判断,但截止目前尚没有一个好的优化方法^[6]。本文就是分析后一类区域覆盖星座的优化方法。

文献[7]提出了一种覆盖纬度带的星座优化方法,但计算结果并不理想,有时星座要求还高于全球覆盖星座。我们提出一种新的星座优化算法——弧段算法*,其特点是把对地球区域的覆盖问题等价于对卫星服务区有效弧段的覆盖问题,据此得出的区域单重覆盖 Walker 星座是目前最优的。

本文的目的是将弧度算法推广用于建立区域多重覆盖 Walker 星座,并给出了应用实例。

二、星座优化弧段算法

当一颗卫星在轨道上运行时,在任一时刻,它对地球表面有一圆形覆盖范围,如图 1

* F. Y. Yuan and K. Matsushima, Proceedings of International Conference on Communication Technology (ICCT'94), Vol. 1, p. 21.04.1, Shanghai, 1994.

本文于1994年11月7日收到。

所示。其中 H 为卫星离地高度, θ 为卫星覆盖区的地心半张角, σ 为地面对卫星的最小观察仰角, R_e 为地球半径。三者之间存在着如下关系式:

$$H = [\cos\theta / \cos(\theta + \sigma) - 1] \times R_e. \quad (1)$$

卫星星座的优化目的可以表述为: 在给定星座中卫星总数的条件下, 寻求最优配置星座中各卫星的相对位置, 以使连续覆盖指定区域所需的 θ 值达到最小。由(1)式可知: 当 H 给定时, θ 越小, 意味着 σ 越大(服务质量越好); 而当 σ 给定时, θ 越小, 意味着 H 越低(从而发射卫星越便宜)。因此, θ 是衡量一个卫星星座优劣的指标。

当卫星星座在运动时, 它覆盖指定区域所需的最小 θ 值是随时间而变的。因此, 要达到连续覆盖的目的, 就要求出卫星星座在一个运动周期内的最大 θ 值需求。

1. 以前的优化星座方法

对于全球覆盖, 一种被广泛采用的最优星座是用三角形算法得出的 Walker 星座。它的部署方式是, 卫星采用圆轨道, 所有卫星的轨道高度和仰角都相同, 卫星轨道面的升交点在赤道面上均匀分布, 每个轨道面上的卫星数相同, 并在轨道面上均匀分布。三角形算法是通过调节相邻轨道面上卫星间的相位差, 使得星座所需的 θ 值最小。

Walker 星座可以表述为 $T/P/F$, 其中 T 为卫星数, P 为轨道面数(此时, 每个轨道面上的卫星数为 T/P); F 为调相因子, 用来确定一轨道面上的卫星相对另一相邻轨道面上卫星的位置。 F 取值范围是 1 到 P 的整数, 单位为 $360^\circ/T$ (即相邻轨道面上的卫星相位差 $= F \times 360^\circ/T$)。

对于纬度带覆盖, 三角形算法^[3]不能给出相应的最优覆盖星座。Rider 给出一种网眼算法^[4], 其星座的构成方法大体上与 Walker 星座相似, 但没有在相邻轨道面上的卫星之间进行相位优化, 因此 Rider 的星座要比相位优化星座要差。本文的工作是用新的算法产生区域多重覆盖 Walker 星座, 结果优于 Rider 的星座。

2. 弧段算法

(1) 有效弧段

假设所要覆盖的是在南纬 ϕ_1 和北纬 ϕ_2 之间的 A 区域(如图 2 所示), 卫星 S 在某个时刻的覆盖区如图中所示, 我们考察这个覆盖区的圆周弧段。可以看出, 图中的阴影部分对于覆盖 A 区域是没有贡献的, 相应的那部分弧段 \overline{ab} 称为无效弧段, 而落在 A 区域内的剩余弧段 \overline{ba} 则称为该卫星的有效弧段。

(2) 未被覆盖弧段

现在假设对区域 A 要实现 K 重连续覆盖, 即对 A 区域中的任意一点, 在任何时刻至少有 K 颗卫星的覆盖区能够同时覆盖住它。通过考察发现, 如果 A 区域被 K 重覆盖, 那么自然所有卫星有效弧段上的点也被 K 重覆盖; 反之, 如果所有卫星有效弧段上的点都被 K 重覆盖, 则整个 A 区域也将被 K 重覆盖。因此, 可以把卫星星座对区域 A 的 K 重覆盖问题, 转化成对卫星有效弧段的 K 重覆盖问题。我们已作了简单的证明, 说明在任一时刻, “ K

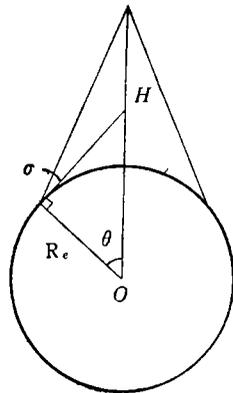


图 1 卫星覆盖的几何关系

Fig. 1 Geometry of Satellite Coverage

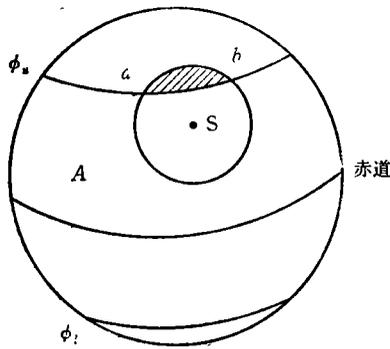


图 2 有效弧段 \overline{ba}
Fig. 2 Useful Arc \overline{ba}

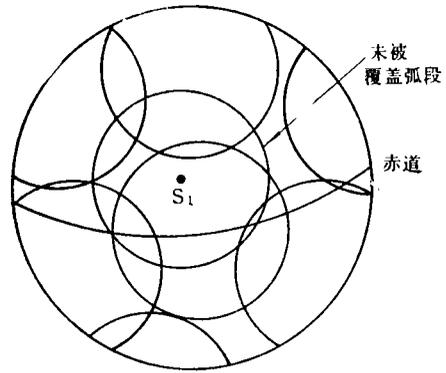


图 3 卫星 S_1 的未被覆盖弧段
Fig. 3 Uncovered Arc of Satellite S_1

“ K 重覆盖区域”与“ K 重覆盖所有卫星的有效弧段”是等价的。

如果一个卫星星座在给定时刻 t 和卫星覆盖区地心半张角 θ 的情况下，不能完成对区域 A 的 K 重覆盖，那么，至少可以找到一颗卫星，它的有效弧段的某些部分没有被 K 颗卫星的覆盖区所覆盖。此时，称这些部分为未被覆盖弧段（显然未被覆盖弧段是有效弧段的一部分）。为简单起见，仅考察一重覆盖（ $K = 1$ ）的情形。如图 3 所示，此时，需覆盖的区域为地球表面。对于图中 S_1 卫星来说，它的有效弧段的某一部分没有被“至少一颗卫星的覆盖区”所覆盖，因此，整个星座此时也未能一重覆盖住地球表面。这个简单例子说明了对覆盖卫星有效弧段的考察，可以替代对区域 A 中所有点的覆盖考察。

由于卫星的有效弧段和未被覆盖弧段都是随时间而变的，根据以上分析，可以得出如下性质：

性质 1 若在时刻 t ，记星座中各卫星的“未被（ K 重）覆盖弧段”的弧长分别为 $L_i^k(t)$ ， $i = 1, 2, \dots, T$ ($0 \leq L_i^k(t) \leq 2\pi$)，此时星座覆盖指定区域的充要条件是

$$\sum_{i=1}^T L_i^k(t) = 0, \tag{2}$$

或
$$L_i^k(t) = 0, \text{ 对 } i = 1, 2, \dots, T. \tag{3}$$

当(2)式不满足时，即 $\sum_{i=1}^T L_i^k(t) > 0$ ，它表明此时的 θ 值太小，通过增大 θ ，最终可满足(2)式。

于是，若要使一个含 T 颗卫星的卫星星座连续覆盖区域 A ，记星座的一个运行周期为 $[t_0, t_1]$ ，有：

性质 2 卫星星座连续 K 重覆盖区域 A 的充要条件是：对任一 t ($t_0 \leq t \leq t_1$) 有

$$\sum_{i=1}^T L_i^k(t) = 0,$$

或

$$L_i^k(t) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, T.$$

基于性质 2，就可以建立基于计算未被覆盖弧段的星座优化方法。与以往广为使用

的 Walker 三角形分析方法等相比, 弧段算法具有独特的优点: (1) 可应用于更为广泛的情形。如对于不仅纬度限定、而且经度也限定的区域连续覆盖, 也可以通过上述计算方法得出最优星座; (2) 可用于对采用椭圆轨道的星座优化。前面所列的几种算法都是针对采用圆轨道的星座而优化的, 对于椭圆轨道星座, 卫星的覆盖区大小随时间而变, 而且在任一时刻, 各卫星的覆盖区可能大小不等, 此时用上述那些方法是无法优化的。

三、计算结果与实际应用

1. 根据以上算法, 对以下三种纬度限定区域计算一重和四重覆盖星座: (1) $\phi_w = 90^\circ$, $\phi_1 = -90^\circ$; (2) $\phi_w = 70^\circ$, $\phi_1 = -70^\circ$; (3) $\phi_w = 50^\circ$, $\phi_1 = -50^\circ$ 。数值结果见表 1 和表 2。

表 1 一重覆盖

T	($90^\circ, -90^\circ$)	($70^\circ, -70^\circ$)	($50^\circ, -50^\circ$)
5	5/5/1, 69.22, 43.8	s	5/5/1, 58.67, 0.0
6	6/6/2, 67.42, 53.6	6/6/2, 66.83, 51.7	6/3/2, 56.17, 0.0
7	7/7/5, 60.34, 56.0	s	7/7/1, 54.61, 0.0
8	8/2/1, 56.67, 47.8	s	8/2/1, 53.57, 0.0
9	9/9/7, 54.82, 68.2	9/9/3, 53.17, 48.2	9/9/6, 49.83, 42.6
10	10/5/2, 52.24, 57.1	s	10/2/2, 45.31, 36.8
11	11/11/4, 47.68, 53.2	s	s
12	12/6/3, 47.59, 65.2	12/6/3, 45.21, 48.5	12/2/1, 43.53, 36.8
13	13/13/5, 43.82, 58.4	s	13/13/2, 42.52, 36.7
14	14/7/4, 42.00, 54.1	s	14/7/1, 39.40, 36.6
15	15/3/1, 42.09, 53.8	15/15/6, 40.44, 51.1	15/3/1, 38.65, 37.8
16	16/8/5, 40.16, 56.5	s	s
17	17/17/7, 39.43, 55.0	s	17/17/10, 35.79, 39.9
18	18/9/6, 39.82, 63.1	18/9/6, 37.02, 50.6	18/3/3, 34.79, 37.0
19	19/19/5, 38.21, 59.4	s	19/19/5, 34.73, 47.5
20	20/10/7, 38.67, 54.0	20/5/5, 37.95, 54.0	20/5/5, 32.11, 38.4

表中的数据格式为: $T/P/F, \theta_{opt}, i_{opt}$, 其中, $T/P/F$ 的定义同前, θ_{opt} 为最优 θ 值, i_{opt} 为最优倾角。“ s ”表示与左边数据相同。

计算表明: (1) 对于单重覆盖而言, 若 θ 给定, 则当被覆盖区逐渐减小时, 星座中卫星数也随之减少, 如当 θ 值取为 38.6° 时, 覆盖三种区域的卫星数分别为 20、18 和 15 颗。但对多重覆盖而言, 减小覆盖区域, 却并不一定能相应减少卫星数; (2) 另外, 当覆盖区域减小、且卫星数较少时, 最优星座的倾角多取为零度, 也即此时星座退化成赤道星座; (3) 与以往结果相比^[7], 本算法得出的星座是最优的。

2. 利用本方法探讨美国 Loral/Qualcomm 公司提出的 Globalstar 全球卫星移动通信系统。目前, 该系统的卫星星座设计为: 48 颗卫星, 呈 48/8/1 Walker 星座, 轨道高度 1389km, 轨道倾角 52° , θ 值为 26.03° 。系统要求连续覆盖 ($\phi_w = 72^\circ$, $\phi_1 =$

表 2 四重覆盖

T	(90°, -90°)	(70°, -70°)	(50°, -50°)
11	11/11/4, 85.32,68.3	s	s
12	12/12/2, 82.40,57.6	12/4/1, 80.15,0.0	12/4/1, 71.25,0.0
13	13/13/2, 77.19,45.8	s	s
14	14/7/4, 75.98,61.8	s	s
15	15/15/2, 70.83,55.4	s	s
16	16/8/5, 70.96,59.6	s	16/8/2, 62.97,0.0
17	17/17/11, 67.86,56.2	s	s
18	18/3/2, 64.21,54.6	s	s
19	19/19/5, 63.75,56.2	s	s
20	20/10/7, 61.98,59.8	s	20/4/3, 58.67,0.0
21	21/3/2, 58.87,54.3	s	s
22	22/11/5, 60.28,58.2	s	s
23	23/23/3, 59.38,50.7	23/23/19, 58.62,59.0	s
24	24/3/2, 55.08,54.4	s	s
25	25/5/4, 56.82,55.7	s	s

-72°)的区域,但实际上是有空隙的,在运行过程中就可能导致通信质量下降或中断。

应用本文的方法,得出下述替代方案:48/6/1 Walker 星座,轨道高度 1389km,轨道倾角 53.5°, θ 值为 26.4°。该方案的优点是:(1)连续不间断地覆盖指定区域;(2)卫星集中在较少的轨道面上,可用一箭多星减少发射次数;(3)轨道面数少,系统所需在轨备份星数也减少。

四、结 束 语

本文建立了一种新的卫星星座优化方法,得出的区域覆盖星座是目前最优的。该方法的基本思路还可推广到对经、纬度均限定的区域的连续覆盖问题的研究,也可用于建立椭圆轨道最优卫星星座。

致谢 本文在完成过程中,系统所杨庆曾副总工对方法的完善性提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Luders, R. D., *American Rocket Soc. J.*, Vol. 31, p. 179, 1961.
- [2] Adams, W. S. and L. Rider, *J. Astron. Sci.*, Vol. 35, p. 31, 1987.
- [3] Walker, J. G., Royal Aircraft Establishment Technical Report 77044, 1977.
- [4] Beste, D. C., IEEE AES-14, p. 455, 1978.
- [5] Draim, J. E., AIAA-92-1988-CP, 1988.
- [6] Michel, C. and D. Rouffet, AIAA-94-1055-CP, 1994.
- [7] Rider, L., *J. Astron. Sci.*, Vol. 31, p. 31, 1986.

WALKER CONSTELLATIONS FOR REDUNDANT ZONAL COVERAGE

Yuan Fu-yin Lu Zhen-lin

(Beijing Institute of System Engineering, 100101)

Abstract

A new method is introduced for optimizing satellite constellations. By which, the best satellite constellations for zonal coverage are derived. And application example is also presented in the paper.

Key words Satellite constellations, Multiple coverage, Zonal coverage, Optimization