

混合星座星间链路的建立以及 连通性和稳健性分析

韩松辉^{1,2} 归庆明² 李建文¹ 杜院录²

(1 信息工程大学测绘学院,郑州市陇海中路 66 号,450052)

(2 信息工程大学理学院,郑州市科学大道 62 号,450001)

摘要:首先,分析了混合星座的特点,并分别讨论了 GEO 卫星、IGSO 卫星和 Walker- δ 星座的服务性能和星间链路的建立特点;然后,运用邻接矩阵给出混合星座连通性的判断标准,运用任意两颗卫星间相连途径的数目、割点、割边、 k -连通度和 k -边连通度给出星间链路稳健性的判断标准,并给出了星座达到 k -连通所需要的最少星间链路的数目及其构建方式;最后,对模拟的 3GEO+3IGSO+24MEO 星座构型中各卫星之间的星间链路建立准则、连通性和稳健性进行了分析。

关键词:混合星座;Walker- δ 星座;星间链路;连通性;稳健性;邻接矩阵;连通度

中图法分类号:P228.41

为了提高导航星座的系统服务性能,很多专家考虑采用 GEO、IGSO 和 MEO 三类卫星组成的混合星座构型。对于此类混合星座构型,很多学者分析了其特点和系统服务性能^[1,2]。

借助星间链路进行信息传递已经成为一种发展趋势,且在星座自主定轨等方面具有巨大应用价值^[3,4]。星间链路的建立要考虑卫星间的方位角、俯仰角^[5,6]和距离,在它们满足一定条件下建立星间链路后,要分析星间链路的性能,尤其是连通性和稳健性,以便判断建立起来的星间链路是否合理^[5]。对于常用的 Walker- δ 星座中星间链路的建立准则以及连通性和稳健性,文献^[5]已进行了研究。但是,混合星座与 Walker- δ 星座不同,它由三类不同的卫星组成,具有结构复杂、操作难度大等特点。因此,本文专门研究混合星座星间链路的建立准则,并分析其连通性和稳健性。

1 GEO 卫星、IGSO 卫星和 MEO 卫星组成的混合星座

混合星座中的 3 类卫星各有特点:GEO 卫星具有高轨、高覆盖性,IGSO 卫星具有更好的高纬度

可视性,MEO 卫星可提供有效的全球覆盖。三类卫星的有机组合可有效提高星座的服务性能。但是,三类卫星组成的混合星座存在卫星类型多、数量多、工作寿命要求长、星座构型复杂等特点。这就增加了混合星座中建立合理星间链路的难度。

1) GEO 卫星。GEO 卫星的轨道参数参见文献^[7]。GEO 卫星所处的轨道较高、覆盖范围较广等特点,在提高了 GEO 卫星与混合星座中其他卫星可见性的同时,也使得它与混合星座中其他卫星之间的距离较远,并且方位角和俯仰角的变化范围大,这不利于星间链路的建立。另外,GEO 卫星的频繁轨道机动也给星间链路的建立带来一定困难。

2) IGSO 卫星。IGSO 卫星的轨道参数参见文献^[7]。在建立星间链路方面,IGSO 卫星与 GEO 卫星一样,同样具有因为卫星轨道高而带来的便利和困难。另外,IGSO 卫星比 GEO 卫星的运动范围更大,使得它与其他卫星之间的方位角和俯仰角的变化范围更大,这也不利于 IGSO 卫星之间建立星间链路。

3) MEO 卫星组成的 Walker- δ 星座。在混合星座中,MEO 卫星之间往往组成 Walker- δ 星

座。Walker- δ 星座以各轨道对参考平面有相同的倾角,以及节点按等间隔均匀分布为特征。Walker- δ 星座中的 MEO 卫星之间建立星间链路比较容易,但是,MEO 卫星与其他两类卫星之间建立星间链路相对比较困难。

2 用图论知识分析混合星座的连通性和稳健性

2.1 用邻接矩阵判断星间链路的连通性和稳健性

以卫星节点作为图中的点,以星间链路作为图中的边,则混合星座中的卫星和星间链路组成的图 G 的邻接矩阵 A 为:

$$A = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & \cdots & S_v \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_v \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1v} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2v} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{v1} & a_{v2} & \cdots & a_{vv} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

其中, $S_i (i=1,2,\dots,v)$ 表示混合星座中的卫星; v 是卫星的数目; a_{ij} 是非负整数,表示卫星 S_i 与 S_j 之间有几条星间链路, $i,j=1,2,\dots,v$ 。邻接矩阵 A 是对称矩阵,由于卫星自身与自身之间不会有星间链路,所以邻接矩阵 A 的对角元素均为零。

邻接矩阵有以下性质,可用于判断混合星座星间链路的连通性和稳健性^[8]。

性质 1 设 A 是 v 阶图 G 的邻接矩阵, $v \geq 3$,令 $R = A + A^2 + \cdots + A^{v-1}$,则图 G 连通的充分必要条件是矩阵 R 中每个元素均不为零。

性质 2 设 A 是 v 阶图 G 的邻接矩阵, $R_k = A + A^2 + \cdots + A^k = (r_{ij})_{v \times v}$,则 r_{ij} 等于图 G 中从顶点 S_i 到 S_j 长度不超过 k 的途径的数目。

建立邻接矩阵以后,根据性质 1,只要看矩阵 R 中是否有零元素,即可判断混合星座星间链路是否连通。性质 2 给出了一种判断混合星座星间链路稳健性的标准,星座中任意两颗卫星之间的长度不超过 k 的途径的数目越多,则表明此星间链路的连通性越好。

2.2 用 k -连通度和 k -边连通度判断星间链路的稳健性

k -连通度和 k -边连通度是基于割点和割边定义的^[8]。

定义 1 设 G 是一个图, s 是 G 的一个点,如果去掉 s 之后图 G 的连通分支数目增加,则称 s 为图 G 的一个割点。

定义 2 设 G 是一个图, e 是 G 的一条边,如

果去掉 e 之后图 G 的连通分支数目增加,则称 e 为图 G 的一条割边。

在混合星座的卫星和星间链路组成的图中,应严禁割点和割边的出现,否则其星间链路的稳健性会很差。一旦作为割点的卫星损坏或者是作为割边的星间链路断开,则由卫星和星间链路组成的图将不再连通。即使作为割点的卫星和作为割边的星间链路正常工作,利用星间链路进行自主定轨时,由于割点和割边的存在,会出现星座整体扭曲的现象,也就是割点或割边连接的两部分之间存在扭曲^[5]。

定义 3 图 G 的连通度定义为 $\kappa(G) = \min \{|V'| | V' \text{ 是连通图 } G \text{ 的点割集}\}$,其中 $|V'|$ 是 V' 中包含的点的个数。如果 $\kappa(G) \geq k$,则称图 G 是 k -连通的。

定义 4 图 G 的边连通度定义为 $\kappa'(G) = \min \{|E'| | E' \text{ 是连通图 } G \text{ 的边割集}\}$,其中 $|E'|$ 是 E' 中包含的边的个数。如果 $\kappa'(G) \geq k$,则称图 G 是 k -边连通的。

如果由卫星和星间链路组成的图 G 是 k -连通的,则任意 $k-1$ 颗卫星损坏,图 G 仍然是连通的;如果图 G 是 k -边连通的,则任意 $k-1$ 条星间链路断开,图 G 仍然是连通的。 k -连通度和 k -边连通度刻画了混合星座星间链路连通程度的高低,很好地描述了混合星座星间链路的稳健性。 k -连通度和 k -边连通度可通过计算机搜索求解,具体算法见文献^[5]。

2.3 星座星间链路达到 k -连通的构建方式

在卫星个数固定的情况下,希望用最少的星间链路使得星座达到一定的 k -连通度。根据图论的有关理论,可以证明 n 颗卫星组成的星座达到 k -连通($k < n$) 所需的最小星间链路数不小于 $kn/2$ 。进一步,根据图论中 Harary 的思想^[8],以 n 颗卫星为顶点、 $[kn/2]$ 条星间链路为边的 k -连通图(记这种图为 $H_{k,n}$,其顶点集为 $V(H) = \{0,1,2,\dots,n-1\}$,其中,数字 $0,1,2,\dots,n-1$ 分别代表星座中的卫星)可构造如下。

1) 若 k 为偶数,设 $k=2r$,则当且仅当 $0 \leq j-i+r \leq 2r \pmod{n}$ 时,卫星 i 与 j 之间建立星间链路, $i,j \in V(H)$ 且 $i \neq j$ 。

2) 若 k 为奇数(设 $k=2r+1$),而 n 为偶数,则先构造 $H_{2r,n}$,然后对 $1 \leq i \leq n/2$ 的 i ,在卫星 i 与 $i + \frac{n}{2}$ 之间建立一条星间链路。

3) 若 k 为奇数(设 $k=2r+1$),而 n 也为奇数,则先构造 $H_{2r,n}$,然后对 $1 \leq i \leq \frac{n-1}{2}$ 的 i ,在卫

星 i 与 $i + \frac{n+1}{2}$ 之间建立一条星间链路, 再在卫星 0 与 $\frac{n-1}{2}$ 之间、卫星 0 与 $\frac{n+1}{2}$ 之间各建立一条星间链路。

当星座有 n 颗卫星时, 用以上方法构造星间链路, 即可用最少的 $[kn/2]$ 条星间链路使得其星座是 k -连通的。如果此方法进一步结合星间链路的方位角、俯仰角和距离, 可以给出更好的星间链路建立准则。反过来, 此方法也可用于验证已有星间链路建立准则的优劣。如果 n 颗卫星组成的星座建立的星间链路是 k -连通的, 但是星间链路的数目大于 $[kn/2]$, 则这种星间链路的建立准则是不合理的。

3 仿真与分析

采用 STK 模拟文献[2]中的 3GEO+3IGSO+24MEO 星座。3 颗 GEO 卫星分别定点在东经 60° 、 110° 和 140° , 3 颗 IGSO 卫星的交叉点在东经 118° , 轨道倾角为 55° , 24 颗 MEO 卫星组成 Walker24/3/2 子星座, MEO 卫星的高度和轨道倾角均采用 GPS 系统 SPS(2001) 标准给出的参数, 分别为 26 559.8 km 和 55° 。

3.1 Walker- δ 星座中的星间链路

根据文献[5]提出的星间链路建立准则,

Walker24/3/2 子星座中同轨道面内相邻的卫星之间以及相邻轨道卫星平均近点角相差 15° 的卫星之间均建立星间链路, 其建立的 48 条星间链路是 4 连通的, 这与构建 $H_{4,24}$ 图最少需要 48 条星间链路一致。

3.2 GEO 卫星和 IGSO 卫星组成的子星座中的星间链路

对于 GEO 卫星和 IGSO 卫星组成的子星座, 由于 GEO 卫星轨道资源有限, 所以 GEO 卫星要频繁地作轨道机动, 大概 20~30 d 就要进行轨道机动, 寿命比较短。IGSO 卫星大概 200 d 要进行一次轨道机动, 相对于 MEO 卫星的每年一次轨道机动而言, 寿命长度也受影响。并且 GEO 卫星和 IGSO 卫星的发射成本相对于 MEO 卫星而言高很多。所以, 应该在 GEO 卫星和 IGSO 卫星组成的子星座中少建立星间链路, 以便降低 GEO 卫星和 IGSO 卫星的载荷, 提高卫星和星间链路的可靠性。

各颗 GEO 卫星与 3 颗 IGSO 卫星之间的星间链路具有同样的方位角、俯仰角和距离变化范围, 即在建立星间链路方面, 3 颗 IGSO 卫星相对于各颗 GEO 卫星而言地位相当, 故只需讨论 IGSO 卫星 1。GEO 卫星和 IGSO 卫星组成的子星座中各条星间链路的方位角、俯仰角和距离的变化范围的计算结果如表 1 所示。

表 1 混合星座 GEO 卫星和 IGSO 卫星之间的星间链路参数

Tab. 1 ISL Parameters of GEO Satellites and IGSO Satellites in Mixed Constellation

星间链路	方位角范围/ $(^\circ)$	俯仰角范围/ $(^\circ)$	距离范围/km
IGSO1 和 IGSO2	[0.0, 106.6], [253.4, 360.0]	[-47.1, -10.6]	[15 571.2, 61 816.4]
IGSO2 和 IGSO3	[0.0, 106.6], [253.4, 360.0]	[-47.1, -10.6]	[15 571.2, 61 816.4]
IGSO3 和 IGSO1	[0.0, 106.6], [253.4, 360.0]	[-47.1, -10.6]	[15 571.2, 61 816.4]
GEO1 和 GEO2	[180.0, 180.0]	[-25.0, -25.0]	[35 638.4, 35 638.4]
GEO2 和 GEO3	[0.0, 0.0]	[-15.0, -15.0]	[21 826.0, 21 826.0]
GEO1 和 GEO3	[180.0, 180.0]	[-40.0, -40.0]	[54 204.8, 54 204.8]
GEO1 和 IGSO1	[119.9, 240.1]	[-39.4, -25.8]	[36 662.5, 53 482.1]
GEO2 和 IGSO1	[0.0, 99.1], [261.0, 360.0]	[-27.8, -3.9]	[5 673.7, 39 349.7]
GEO3 和 IGSO1	[96.0, 264.0]	[-29.3, -9.4]	[13 823.7, 41 319.3]

由表 1 可以看出:

1) 在方位角、俯仰角和距离的变化范围方面, 3 颗 IGSO 卫星之间的星间链路具有相同的特性, 这验证了它们地位是相当的结论。

2) IGSO 卫星之间要建立星间链路, 必须经历最大传输距离 61 816.4 km, 并且方位角的变化范围达到 214° , 这些因素影响星间链路的可靠性, 使得 IGSO 卫星之间的星间链路中断的概率比较大。

3) 根据 $H_{2,6}$ 连通图, GEO 卫星和 IGSO 卫

星组成的子星座要达到 2-连通, 至少需要 6 条边。根据星间链路的方位角、俯仰角的变化范围最小和平均距离最短的原则, GEO 卫星之间必须要建立星间链路。但是, GEO 卫星之间建立星间链路之后画出的 $H_{2,6}$ 图如图 1 所示。这时, 在 6 条星间链路达到 2-连通的要求下, IGSO 卫星之间亦必须建立星间链路, 而 IGSO 卫星之间的星间链路不可靠, 故图 1 的连接方式不可取。如果 IGSO 卫星之间不建立星间链路, 则 IGSO 卫星与 GEO 卫星之间必须建立星间链路, 并且为了使 6

条星间链路达到 2-连通的稳健性,必须如图 2 所示构造 $H_{2,6}$ 图。此时,图 2 中没有了 IGSO 卫星之间的星间链路,但同时也没有了 GEO 卫星之间的星间链路。故图 2 相对于图 1 而言,只建立了性能一般的星间链路,放弃了性能最好和性能最差的星间链路。

4) 根据 $H_{3,6}$ 连通图,GEO 卫星和 IGSO 卫星组成的子星座要达到 3-连通,至少需要 9 条边。按前文给出的 $H_{3,6}$ 图构造法,则由图 1 和图 2 扩展之后的星间链路拓扑结构分别如图 3、4 所示。图 3 中在包含 GEO 卫星之间的星间链路的同时,也包含 IGSO 卫星之间的星间链路。图 4 中同时不包含 IGSO 卫星之间和 GEO 卫星之间的

星间链路。图 1、2 还可以通过其他方式拓展到 3-连通拓扑结构,但是不存在只包含 GEO 卫星之间星间链路而不包含 IGSO 卫星之间星间链路的拓扑结构。

5) 为了不在 IGSO 卫星之间建立星间链路,并且降低 GEO 卫星负荷,可考虑在 GEO 卫星和 IGSO 卫星组成的子星座中建立 2-连通的星间链路网络。另外,GEO 卫星之间的星间链路性能很好,应保留之,即增加 2 条星间链路即可构成图 5 的拓扑结构。此时,整个子星座的连通度仍然是 2-连通的,但是保留了 GEO 卫星之间的星间链路,也就是保留了 GEO 卫星和 IGSO 卫星组成的子星座中最稳定的星间链路,是可取的。

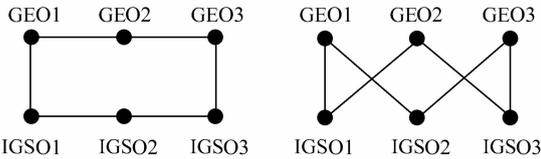


图 1 $H_{2,6}$ 图的连接方式 1 Fig. 1 Connection Method 1 of Diagram $H_{2,6}$
图 2 $H_{2,6}$ 图的连接方式 2 Fig. 2 Connection Method 2 of Diagram $H_{2,6}$

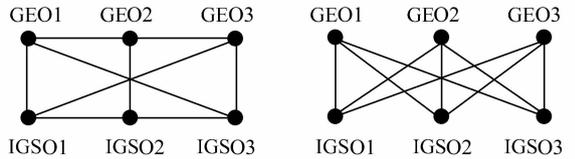


图 3 由图 1 得到的 $H_{3,6}$ 图 Fig. 3 Diagram $H_{3,6}$ Obtained from Fig. 1
图 4 由图 2 得到的 $H_{3,6}$ 图 Fig. 4 Diagram $H_{3,6}$ Obtained from Fig. 2

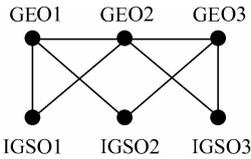


图 5 由图 2 增加 GEO 卫星之间两条星间链路得到的图 Fig. 5 Increasing Two ISLs Between GEO Satellites in Fig. 2

3.3 GEO 卫星与 MEO 卫星之间、IGSO 卫星与 MEO 卫星之间的星间链路

GEO 卫星与 MEO 卫星之间不适合建立永久星间链路。这是因为有 11 颗 MEO 卫星和 GEO 卫星不是持续可见的,虽然另外 13 颗 MEO 卫星和 GEO 卫星持续可见,并且俯仰角的变化范围不大,但是星间链路方位角的变化范围均是从 0° 到 360° ,并且最大星间距离均超过 64 352.5 km。IGSO 卫星与 MEO 卫星之间也不适合建立永久星间链路。这是因为 24 颗 MEO 卫星中只有 6 颗和 IGSO 卫星是持续可见的,虽然这 6 条星间链路俯仰角的变化范围不大,但是所有星间链路方位角的变化范围也是从 0° 到 360° ,并且最大星间距离均超过 65 835.7 km。这些不利因素均使得星间链路不可靠。应该在限制最大星间距离的条件下建立星间链路。例如,在 24 h 的时间内,采用同步轨道半径 42 164.2 km

为最大星间距离,则 GEO 卫星 1 和 IGSO 卫星 1 分别与 24 颗 MEO 卫星可见时间的分布如图 6、7 所示。

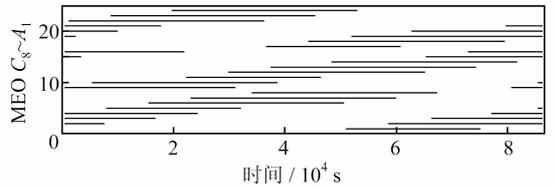


图 6 最大星间距离为 42 164.2 km 时 GEO 卫星 1 与 24 颗 MEO 卫星可见时间

Fig. 6 Visibility of GEO Satellite 1 and 24 MEO Satellites when the Maximum Distance of ISL is 42 164.2 km

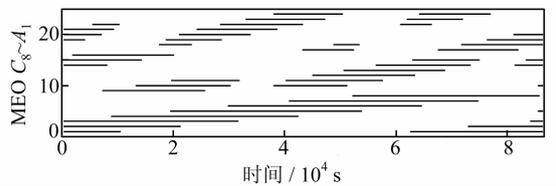


图 7 最大星间距离为 42 164.2 km 时 IGSO 卫星 1 与 24 颗 MEO 卫星可见时间

Fig. 7 Visibility of IGSO Satellite 1 and 24 MEO Satellites when the Maximum Distance of ISL is 42 164.2 km

由图 6 和图 7 可以看出:

1) 在固定星间链路距离的条件下,IGSO 卫星与 MEO 卫星之间的可见时间段比较散,并且

可见时间持续比较短;而 GEO 卫星与 MEO 卫星之间的可见时间段相对要集中,并且可见时间持续相对比较长。GEO 卫星一般可同时与 8~10 颗 MEO 卫星可见;而 IGSO 卫星就少一些,一般可同时与 6~10 颗 MEO 卫星可见。

2) 以早上 10:10 为例,在固定星间链路距离的条件下,GEO 和 IGSO 两类卫星可见的 MEO 卫星数量均较少,GEO 卫星分别与 A_4 、 A_5 、 A_6 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 C_5 、 C_6 和 C_7 这 9 颗 MEO 卫星可见,IGSO 卫星分别与 A_6 、 A_7 、 A_8 、 C_1 、 C_7 和 C_8 这 6 颗 MEO 卫星可见。尽管如此,GEO 卫星、IGSO 卫星分别与 MEO 卫星之间可建立的星间链路,已经足够满足卫星自主定轨等方面的需求。

3) 为了减少 GEO、IGSO 两类卫星的载荷,它们与 MEO 卫星之间的星间链路可按如下方式建立:GEO 卫星和 IGSO 卫星向地球方向发射信号,在最大星间链路距离的要求下,与可见的 MEO 卫星之间建立星间链路。所以,GEO、IGSO 两类卫星与 MEO 卫星之间的星间链路均是临时星间链路,存在星间链路的建立-断开-重建过程。

4) 由于地球遮挡,GEO 卫星、IGSO 卫星与个别 MEO 卫星的可见时间比较短。

3.4 混合星座的连通性和稳健性分析

如果 MEO 卫星之间采用 § 3.1 节中给出的星间链路,IGSO 卫星、GEO 卫星分别与 MEO 卫星之间的星间链路均采用 10:10 时刻情况,IGSO 卫星和 GEO 卫星组成的子星座中的星间链路采取图 5 的连接方式,则此混合星座的连通性、割点、割边、 k -连通度、 k -边连通度和 RoadNum 的计算结果如表 2 所示,其中,RoadNum 为图 G 中任意两点之间长度不超过 24 的途径数目的最小值,此处途径中多一条边,表示两点间长度增加 1。

表 2 混合星座 3GEO+3IGSO+24MEO 的稳健性参数
Tab. 2 Robustness Parameters of United Constellation

星座	连通性	割点	割边	k -连通度	k -边连通度	RoadNum
3GEO+3IGSO+24MEO	连通	无	无	4	4	2.205×10^{24}

由表 2 可以看出:

1) 整个混合星座是连通的,不包含割点和割边, k -连通度和 k -边连通度均达到了图 G 中顶点的最小度,具有很好的稳健性。另外,RoadNum 值比较大,这说明此混合星座星间链路网络的整体性比较好。

2) 虽然 IGSO 卫星与 MEO 卫星、GEO 卫星与 MEO 卫星之间的星间链路数目比较多,但是

在某一时刻,总有 MEO 卫星均不与 IGSO 卫星、GEO 卫星相连,所以,IGSO 卫星与 MEO 卫星以及 GEO 卫星与 MEO 卫星之间的星间链路不能提高整个混合星座的连通度。

3) 由于 MEO 卫星的数量远大于其他两类卫星的数量,所以 Walker- δ 子星座星间链路的连通度大小决定了整个混合星座星间链路的连通度大小。

4 结 语

1) 混合星座中星间链路的建立准则为: Walker- δ 子星座中每颗 MEO 卫星与前、后、左、右 4 颗 MEO 卫星之间建立永久星间链路;GEO 卫星与 IGSO 卫星组成的子星座中,选择在 GEO 卫星与 GEO 卫星之间,以及 GEO 卫星与 IGSO 卫星之间建立永久星间链路;GEO、IGSO 两类卫星与 MEO 卫星之间不适合建立永久星间链路,可在最大星间链路距离的要求下建立临时星间链路。

2) 本文建立的星间链路充分考虑了星间链路方位角、俯仰角和距离的影响,并且均用最少的星间链路使得星座达到了一定的 k -连通度。

3) 从星间链路的角度出发,对于本文讨论的 3GEO+3IGSO+24MEO 的星座构型,GEO 卫星 2 应向 GEO 卫星 1 靠近一点,以便减少 GEO 卫星 2 与三颗 IGSO 卫星之间的方位角变化范围。即 IGSO 卫星星下点轨迹的交叉点与两边的 GEO 卫星之间应保持较远的距离,以减少星间链路的方位角和俯仰角的变化范围。

4) 虽然 IGSO 卫星可提供较好的覆盖性,但是由于 IGSO 卫星的运动范围比较大,使得它与其他卫星之间建立星间链路比较困难,这也不利于 IGSO 卫星之间建立星间链路。所以设计新的混合星座时,在服务性能可以满足要求的情况下,应尽量避免采用 IGSO 卫星。

参 考 文 献

- [1] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 391-396
- [2] 连远锋, 赵刻, 吴发林. 北斗二代卫星导航系统全球可用性分析[J]. 电子测量技术, 2010, 22(2): 15-18
- [3] 范丽, 张育林. Walker 星座星间链路构建准则及优化设计研究[J]. 飞行力学, 2007, 25(2): 93-96
- [4] 宋小勇, 毛悦, 贾小林, 等. 基于星间测距的分布式自主星历更新算法[J]. 武汉大学学报·信息科

- 学版, 2010, 35(10): 1 161-1 164
- [5] Han Songhui, Gui Qingming, Li Jianwen. Analysis of the Connectivity and Robustness of Inter-satellite Links in a Constellation[J]. Science China Physics Mechanics & Astronomy, 2011, 54(6): 991-995
- [6] 杨宁虎, 陈力. 卫星导航系统星间链路空间参数与覆盖分析[J]. 飞行器控制学报, 2007, 26(1): 34-37
- [7] 张育林, 范丽, 张艳, 等. 卫星星座理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [8] 高随祥. 图论与网络流理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010
-
- 第一作者简介:**韩松辉, 博士生, 讲师, 研究方向为卫星导航及其测量数据处理。
E-mail: hansonhui@126.com

Analysis of Establishment Criteria, Connectivity and Robustness of Inter-satellite Link in Mixed Constellation

HAN Songhui^{1,2} GUI Qingming² LI Jianwen¹ DU Yuanlu²

(1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University,
66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

(2 Institute of Science, Information Engineering University, 62 Kexue Road, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve service performance of navigation constellation, many experts consider the mixed constellation configuration of GEO satellite, IGSO satellite and MEO satellite. In the design of the new constellation configuration or the research of the existing constellation performance, the inter-satellite link (ISL) is needed to be established, and the connectivity and robustness of the ISL are needed to be analyzed. The characteristics of the mixed constellation configuration are analyzed, and the characteristics of ISL establishment and the service performance of GEO satellite, IGSO satellite and Walker- δ constellation are discussed firstly. Then, the method to determine ISL connectivity in the mixed constellation by the adjacency matrix is put forward, and the standards of the ISL robustness are given using the number of ways between any two satellites, cutting point, cutting edge, k -connectivity degree and k -edge connectivity degree of graph theory. The minimum required number of ISLs of a k -connectivity's constellation and the construction method of k -connectivity's constellation are given for the first time. Finally, the 3GEO+3IGSO+24MEO constellation configuration is simulated. The criteria for ISL establishment, the connectivity and robustness of this mixed constellation configuration are studied, and many important conclusions are obtained.

Key words: mixed constellation; Walker- δ constellation; ISL; connectivity; robustness; adjacency matrix; connectivity