

# 用于地空通信的单轨小卫星组网轨道特性研究

李波, 毛玉泉, 杨霄鹏, 褚振勇, 张衡阳

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要** 提出了采用小卫星组网的方法来解决战斗机超视距通信问题。为实现某一局部区域的超视距通信保障, 提出并设计了单轨道小卫星组网方案, 多颗小卫星单轨道组网实现简单, 只要数量足够多, 就能够实现对局部区域的连续通信覆盖, 满足对局部区域作战的超视距通信需要; 研究了单颗小卫星的在不同高度时覆盖范围半径、覆盖区域与地心的夹角等特性; 研究了小卫星组网时, 在轨道高度为 780 km, 不同数量的小卫星组网通信宽度、相临小卫星覆盖范围的重叠宽度和夹角等特性。

**关键词** 小卫星通信; 地空通信; 轨道特性

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.05.011

**中图分类号** TN927 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)05-0050-05

远程地空通信目前采取的方法和手段主要有短波通信、预警机中继通信、高轨道大卫星中继通信、无人直升机中继通信、高空气球中继通信、临近空间平台中继通信等。短波通过电离层反射可进行超视距通信, 但其信道质量差且带宽有限, 难以满足数据链和话音通信需要, 尤其是战斗机机身小、机动快, 短波通信很难有效进行通信; 预警机配合高轨卫星是当前实现中继通信的普遍方式, 存在问题是由于高度原因预警机必须离战斗机很近, 这样易被摧毁, 所以当战斗机深入敌区时, 预警机不能对其进行通信保障; 高轨道大卫星覆盖范围广, 但由于轨道高, 传输时延大、信号衰减大, 对用户终端天线和发射功率要求高, 一般需用定向天线, 不适合用于战斗机, 主要用于大型运输机、轰炸机、预警机等; 无人直升机中继通信、气球中继通信和临近空间平台中继通信都是新提出的中继通信解决方法, 无人直升机只能作为地面一中继节点, 保障范围有限, 且无人直升机受气候影响大, 飞行控制难度大; 气球中继通信存在控制难度大, 机动性差等缺点; 临近空间平台还不成熟, 国内外还没有成熟应用。综上所述, 目前的方法和手段难以有效保障空军远程战略对超视距通信保障需要, 尤其是战斗机超视距通信保障难的问题更加突出。

近些年, 关于小卫星的研究和研制发展迅速, 小卫星研究首先要满足军事应用需求, 其次才是民用。小卫星轨道低、质量轻、体积小、研制周期短、成本低、功能密度大、发射灵活, 在通信、遥感等领域具有广阔的应用前景, 在局部突发战争的军事侦察和通信具有得天独厚的优势。军用小卫星可用于通信和侦察领域, 如战术通信、战略侦察、战场摄影及监视导弹发射、收集战术情报、支援飞机和舰艇作战等<sup>[1-4]</sup>。

小卫星具有的独特优势使其应用于军用具有很好的前景, 小卫星轨道低, 小卫星通信系统对终端用户的收发天线增益和发射功率等要求低, 如其终端支持手持式终端, 这就可以弥补战斗机机身小、全向天线增益差等缺点, 使战斗机直接与小卫星通信成为可能。

本文提出采用单轨道多颗小卫星组网方式实现局部区域的地空超视距通信, 尤其是实现战斗机的超视距通信保障, 文章中设计了单轨多颗小卫星组网通信系统, 研究其卫星高度、覆盖范围、小卫星数量、轨道倾角、偏心率等轨道特性。

\* 收稿日期: 2010-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972042); 航空科学基金资助项目(20095596016); 空军工程大学电讯工程学院创新基金资助项目(DYCX1007)

作者简介: 李波(1974-), 男, 山东青岛人, 讲师, 博士生, 主要从事地空通信和数据链研究.

E-mail: kgdlibo@163.com

# 1 对局部区域连续覆盖的单轨道小卫星组网设计

单颗小卫星在某特定时间保障的通信区域为一圆球面,小卫星轨道为非静止轨道,单颗小卫星无法对某一区域进行连续通信覆盖,也就无法对通信双方进行连续的中继通信服务。目前小卫星通信主要有 2 种:①存储转发通信方式:如甲要与乙通信,当小卫星飞到甲的上方时,甲将信息发送至小卫星,小卫星进行存储,当小卫星飞到乙的上方时,小卫星再将存储的信息发给乙,从而实现甲与乙的通信。如美国在海湾战争和对南空袭期间,紧急发射的 MACSAT 低轨小卫星就是采用存储转发的通信方式,在保证多国部队的军事行动中发挥了重要作用。这种方式实现简单,但通信不连续,不能进行适时通信,覆盖范围有限。这种方式不能满足战斗机适时连续通信需要<sup>[1,5-8]</sup>。②全球覆盖方式:由多轨道几十颗甚至上百颗小星实施全球通信。如铱星系统(Iridium)采用 6 个轨道面,每个轨道面 11 颗星,共 66 颗星实现全球通信覆盖;全球星(Globalstar)采用 8 个轨道面,每个轨道面 6 颗星,共 48 颗星实现全球通信覆盖;轨道通信(Orbcomm)采用 6 个轨道面,每个轨道面 6 颗星,共 36 颗星实现全球通信覆盖。这种方法能进行全球覆盖,且可进行适时通信,但实现技术复杂。

从我国实际情况出发,不需要进行全球通信覆盖,只需要对局部区域覆盖即可。

文中将研究采用单轨道多颗小卫星组网实现对局部区域的连续覆盖,以实现作战区域的连续通信保障。

单颗小卫星通信覆盖范围映射到地球上为一圆球面,见图 1。要实现局部区域的连续覆盖,则需要小卫星数量足够多,以使相邻小卫星的通信覆盖圆球面范围能连接起来。单轨多颗小卫星的通信覆盖范围为一带形区域,见图 2,相邻小卫星重叠区域为一纺锤形,见图 2、图 3。

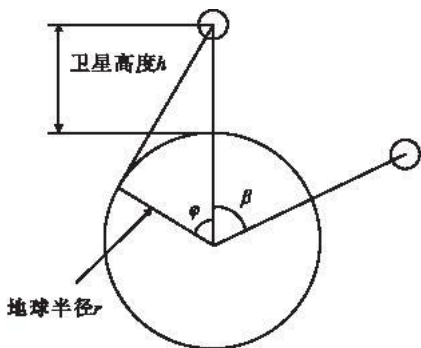


图 1 单颗小卫星圆球面形覆盖区域  
Fig. 1 The round sphere surface area of one satellite

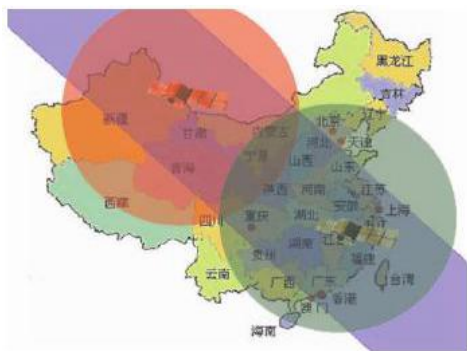


图 2 多颗小卫星的带形覆盖区域  
Fig. 2 The strip area of many satellites

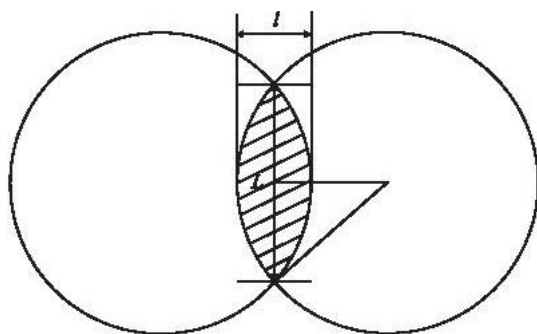


图 3 连续 2 颗小卫星重叠覆盖  
Fig. 3 The overlap area of adjacent two satellites

当小卫星间有星际链路时,通信双方的通信可由多颗小卫星进行中继实现,这样通信双方只要在小卫星网的带形覆盖范围内就可实现通信。

当小卫星无星际链路时,通信双方的中继通信只能有一颗小卫星进行中继实现,这时,通信双方必须位于同一颗小卫星覆盖范围内才能实现通信。即当通信双方的距离位于相邻 2 颗小卫星覆盖重叠区大小范围时,任何时候,总能落入同一颗小卫星的覆盖范围内,即任何时区候都可由一颗小卫星实施中继通信。

如果小卫星群再配一高轨大卫星,则通信范围会更广。对此种方式,本文不作讨论。

基于上面讨论,小卫星群的带形覆盖区域和相邻 2 颗小卫星重叠的纺锤形区域是本文要研究的。与之相关的组网小卫星的数量、小卫星的高度、轨道倾角和轨道偏心率等因素共同影响通信覆盖区域,这也是我们关心和要研究的。

## 2 轨道高度

单颗卫星覆盖区域为一球面。轨道高度越高,单颗卫星对地面的覆盖区域越大,为达到设计要求所需要的卫星数就减少;但卫星轨道高度越高,自由空间传播损耗越大,传输时延越大。较低的轨道高度意味着传播损耗小,传输时延也较小;但卫星高度越低,单颗卫星的覆盖范围越小,为满足覆盖所需的卫星数就越多。

地球半径约为 6 378 km,静止轨道离地面约为 35 786.6 km。Orbcomm 轨道高度为 775/739 km;Iridium 轨道高度为 785 km;Globalstar 轨道高度为 1 414 km<sup>[1]</sup>。

美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)在 1990 年 5 月 9 日利用一枚 SCOUT 212C 火箭发射了 2 颗 MACSAT,轨道近地点 613 km,远地点 739 km,轨道倾角 89.9°<sup>[1,9]</sup>。

MicroSat 是 DSI 公司为 DARPA 制造的一个由 7 颗微小卫星组成的星座,用于评估利用低轨道卫星实现全球通信的可行性,于 1991 年 7 月 17 日由“飞马座”火箭(Pegasus HAPS)以一箭 7 星方式发射,入轨后的轨道近地点为 359 km,远地点 457 km 轨道倾角为 82°<sup>[1,10]</sup>。

假定卫星离地面高度为  $h$ ,地球半径为  $r = 6\,378\text{ km}$ ,则其覆盖区域的直径为  $2R$ ,单颗卫星与地球表面连线最远点的最大夹角为  $2\varphi$ ,见图 1。

$$\varphi = \arccos\left(\frac{r}{r+h}\right) \quad (1)$$

$$2R = 2r\varphi = 2r\arccos\left(\frac{r}{r+h}\right) \quad (2)$$

## 3 小卫星数量

为保证对作战区域的连续覆盖,小卫星数量应保证相临小卫星的覆盖区域连续,并且小卫星数量越多,相临小卫星覆盖的重叠区域也就越多,这样有利于为用户服务的卫星切换实施。

在轨道高度  $h$  确定后,就可以计算出  $\varphi$ ,见式(1)。

如果只考虑对作战区域的连续覆盖,小卫星数量就可以确定如下:

$$n \geq \left\lceil \frac{2\pi}{2\varphi} \right\rceil + 1 \quad (3)$$

式中  $\lceil \cdot \rceil$  表示取整数。

而实际应用中,如果不考虑小卫星网络有星际链路通信,即中继通信只有单颗小卫星来完成,要保证小卫星同时覆盖超视距的通信双方,因此小卫星数量多一些。

## 4 轨道倾角和轨道偏心率

轨道倾角的确定主要依赖于所需覆盖区域的纬度。对于圆轨道而言,对某区域的连续覆盖实际上就是对该区域所在的纬度进行连续覆盖,与经度关系不大。我国处于北纬 4°和 54°之间,其中大陆在 20°和 54°之间<sup>[1]</sup>。

图 2 中,单轨道小卫星组网会形成一带形超视距通信走廊,在此通信走廊中的飞机就可以实现超视距通信。为保障我方飞机作战,如图 2 所示的带形通信区域一方面应覆盖作战区域,另一方面应覆盖对我方作战有利的区域。

作为轨道设计中的一个重要参数,轨道偏心率会影响卫星对局部地区的覆盖情况和过境时间的长短。目前世界上的大多数卫星系统采用圆轨道。Orbcomm、Iridium、Globalstar 都为圆轨道。在此我们设计的小卫星轨道也为圆轨道。

## 5 小卫星组网覆盖情况分析

设定卫星离地面高度用  $h$  表示,地球半径用  $r$  表示(6 378 km),单颗小卫星覆盖地表圆的半径用  $R$  表

示,覆盖的最远 2 点与地心的夹角为  $2\varphi$ ,小卫星数量用  $n$  表示。不同高度的单颗小卫星覆盖范围见表 1。

$$\varphi = \arccos\left(\frac{r}{h+r}\right) = \arccos\left(\frac{6\,378}{h+6\,378}\right) 2R = 2r\varphi = 2r\arccos\left(\frac{r}{h+r}\right) = 2 \times 6\,378 \times \arccos\left(\frac{6\,378}{h+6\,378}\right) \quad (4)$$

通信宽度计算:

相临 2 颗卫星的夹角如图 1 所示: $\beta = 2\pi/n$ 。

则通信区域见图 3,计算如下:

$$L = 2 \sqrt{(r\varphi)^2 - \left(r \frac{2\pi}{2n}\right)^2} = 2r \sqrt{(\varphi)^2 - \left(\frac{\pi}{n}\right)^2} \quad (5)$$

$$l = 2 \left( r\varphi - r \frac{2\pi}{2n} \right) \quad (6)$$

表 1 不同高度的单颗小卫星覆盖范围

Tab. 1 The cover range of one satellite with different height

高度/km	覆盖区域与地心量大夹角 $2\varphi$ /rad	覆盖区域球面直径 $2R$ /km
700	0.897 0	5 721
740	0.920 0	5 868
780	0.942 4	6 010
820	0.964 0	6 148
860	0.984 7	6 282
900	1.005 2	6 411
940	1.024 9	6 537

下面仅以卫星高度为 780 km 为例计算多颗小卫星覆盖时的情况。

由表 2 可知,当卫星高度为 780 km 时,当卫星数量小于 7 时,卫星不能连续覆盖通信区域,而当卫星等于或大于 7 颗星时,就可以对通信区域连续覆盖。但当卫星数量少时,相临卫星重叠覆盖区域较小,当卫星数量增多时,相临卫星重叠覆盖区域变大。

表 2 不同数量的卫星组网覆盖区域

Tab. 2 The cover range of satellite net with different amount unit

卫星数量/颗	相临颗星夹角 $\beta$ /rad	通信宽度 $L$ /km	重叠区域宽度 $l$ /km
5	1.256 6	不连续	不连续
6	1.047 2	不连续	不连续
7	0.897 6	1 830	286
8	0.785 4	3 322	1 001
9	0.698 1	4 037	1 558
10	0.628 3	4 480	2 003
11	0.571 2	4 780	2 367

## 6 结束语

文章中针对实际情况,设计了单轨多颗小卫组网实现对局部区域超视距通信方案,并研究了其轨道高度、卫星数量、轨道倾角、轨道偏心率 and 通信区域覆盖情况。

由分析结果可以看出,当单轨道组网中的卫星间没有星际链路时,只要卫星数量足够多,如卫星高度为 780 km,卫星数量为大于 7 颗星时,就可以满足对台海地区地空超视距通信保障;如果有星际链路,则在小卫星通信带内都可实现超视距通信,通信范围要比没有星际链路广的多;如果再将高轨大卫星加入网络,则通信范围更广。

### 参考文献:

[1] 张更新. 现代小卫星及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2009.  
 ZHANG Gengxin. Morden small satellite and its applications[M]. Beijing:People's post and telecommunications press,2009.  
 (in Chinese)

- [2] 王雅, 苟先太, 吴潜, 等. 基于多 Agent 的小卫星星座组网研究[J]. 西华大学学报:自然科学版, 2009, 28(4): 46-49.  
WANG Ya, GOU Xiantai, WU Qian, et al. Research on small satellite constellation networking based on multi-agent[J]. Journal of Xihua university:natural science edition, 2009, 28(4): 46-49. (in Chinese)
- [3] 张艳娥, 常江, 秦洁. 现代小卫星技术现状与发展[J]. 军事通信技术, 2006, 27(2): 71-76.  
ZHANG Yan'e, CHANG Jiang, QIN Jie. Status and development of modern small satellite technology[J]. Journal of military communications technology, 2006, 27(2): 71-76. (in Chinese)
- [4] 闻新, 杨嘉伟. 军用卫星的发展趋势分析[J]. 现代防御技术, 2002, 30(4): 7-11.  
WEN Xin, YANG Jiawei. An analysis of development trend on military satellite[J]. Modern defence technology, 2002, 30(4): 7-11. (in Chinese)
- [5] 高彬. 小卫星技术的发展现状及其军事应用前景[J]. 天津通信技术, 2003, 20(2): 6-9.  
GAO Bin. Developing actuality tactic and military application foreground of small satellite technology[J]. Tianjin communications technology, 2003, 20(2): 6-9. (in Chinese)
- [6] Sweeting M N. UoSAT microsattelite Missions[J]. Electronics and communications engineering journal, 1992, 4(3): 141-150.
- [7] Keyvan Farazian, Dariush Divsalar, Nasser Golshan, et al. Helicopter satellite communication: development of low-cost real-time voice and data system for aeronautical mobile satellite service (AMSS)[C]//International conference on universal personal communications (ICUPC). Ottawa, Canada: [s. n.], 1993: 314-319.
- [8] Ward J W. Microsatellites for global electronic mail networks[J]. Electronics and communications engineering journal, 1991, 3(6): 267-272
- [9] 张更新, 牛鑫, 张有志. 现代小卫星在通信中的应用[J]. 军事通信技术, 2006, 27(2): 77-80.  
ZHANG Gengxin, NIU Xin, ZHANG Youzhi. Application of modern small satellite into communications[J]. Journal of military communication technology, 2006, 27(2): 77-80. (in Chinese)
- [10] 魏晨曦, 焦雯. 国外军用小卫星的发展及测控技术[J]. 上海航天, 2004, 21(5): 48-52.  
WEI Chenxi, JIAO Wen. Development and TT&C of foreign military small satellites[J]. Aerospace Shanghai, 2004, 21(5): 48-52. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)

## Study of Orbit Characters of Single Orbit Small Satellite Net Used in Ground-air Communication

LI Bo, MAO Yu-quan, YANG Xiao-peng, CHU Zhen-yong, ZHANG Heng-yang  
(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Out-of-sight communication in ground-air communication is a difficult problem; especially the effective implement of the out-of-sight communication on fighters is more difficult. In order to implement ground-air out-of-sight communication, a small single orbit satellite net is proposed. The orbit height of the small satellite is low, so both the communication link loss and the communication transmission time delay are smaller, thus, the requirement in quality for the antenna in fighters is decreased. In this way, it is possible to realize the direct communication between fighters and small satellites. Several satellites in one orbit grouping a net can realize continuous communication cover for parts of an area, so can satisfy the needs for the out of sight communication to parts of an area. The developing period for the small satellite is short, and the launching method of the small satellite is flexible. The orbit characters can also be designed according to the needs of the communication area. These characters of the small satellite accord with the military needs. In this paper, the orbit characters including the orbit height, the quantity of the small satellite, center departure rate, communication cover range, etc are studied.

**Key words:** small satellite communication; ground-air communication; orbit character