

# 基于小卫星的地空超视距通信系统设计与仿真

吴昊, 陈树新, 霍辰杰, 张衡阳<sup>1</sup>

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

**摘要** 远程地空通信的超视距通信是一个亟需解决的难题,为此提出一种以分布在多个椭圆轨道面的小卫星为中继的地空超视距通信方案。对小卫星的轨道参数进行设计,证明了用4颗中轨小卫星可以实现对特定区域99.41%的视距覆盖。研究了小卫星地空超视距通信系统的工作原理和链路传播特性,并在此基础上设计了通信链路的收发参数。仿真结果表明:用该系统进行地空超视距通信不受距离的限制,具有通信效果好、抗毁能力强、成本低等优点。

**关键词** 地空通信;区域覆盖;椭圆轨道;通信覆盖;STK

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.04.014

**中图分类号** TN927 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)04-0070-05

目前,远程地空通信存在超视距通信问题,即由于地球曲率的影响,利用超短波或微波频段进行地空通信时,飞机超出视距范围就无法保障通信的畅通。现有的一些解决方案,如采用预警机中继,虽然能增加地空通信的有效半径,但随着通信距离继续增大,便无法保证通信的顺利进行。

随着科技的不断发展,小卫星以其造价低、功能密度高等特点受到人们的关注,在通信、导航等领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。同时,卫星通信具有通信距离远,覆盖范围广等优点,特别适于解决远程地空通信的超视距问题。利用小卫星实现远程地空通信主要有2种方案:一是建立全球小卫星通信系统,如美国的铱(Iridium)系统<sup>[2]</sup>,它可以保障飞机在全球范围与地面站的通信,但建设周期长,投资巨大;二是建立区域小卫星通信系统,利用小卫星实现对特定区域的覆盖<sup>[3]</sup>,从而保证飞机在该区域内与地面站的通信畅通。在当今局部战争的背景下,后者显然具有更高的效费比。

对于第2种方案,文献[4]提出采用单个圆轨道,利用多颗小卫星组网实现局部地区的地空超视距通信。但由于地球自转,采用单轨道不能有效提高对特定区域覆盖率,轨道的单一还会减少敌方获知卫星参数的时间,对卫星的生存提出挑战。此外,圆轨道卫星匀速运行,单颗卫星工作时间短,效率低,要实现高覆盖率所需的卫星数目较多。文献[5]利用椭圆轨道小卫星在远地点滞留时间长的特性,利用较少的卫星实现了对目标区域的视距覆盖,但没有考虑观测仰角、卫星信道衰减对通信有效性的影响。

为此,本文利用分布在多椭圆轨道的小卫星作为中继,实现了对特定区域和地面站的连续视距覆盖。并在讨论卫星信道链路传播特性的基础上,设计了卫星链路的发射接收参数,最后对通信覆盖效果进行了仿真验证。

## 1 小卫星星座轨道参数的设计

利用小卫星实现对目标区域的视距覆盖是进行地空超视距通信的前提。在地心惯性坐标系中,卫星的运动由轨道倾角、轨道半长轴、升交点赤经、近地点幅角、轨道偏心率和卫星的初始相位来确定,为此需要设

<sup>1</sup> 收稿日期:2012-03-21

基金项目:航空科学基金资助项目(20095596016);空军工程大学信息与导航学院科研创新基金资助项目(DYCX1108)

作者简介:吴昊(1988-),男,陕西汉中,人,硕士生,主要从事空天信息与网络传输研究。

E-mail:wuhaostudy@163.com

计合适的椭圆轨道参数,使得在任意时间至少有一颗小卫星覆盖目标区域。

### 1.1 小卫星轨道参数的设计

假定目标区域为直径为 400 km 的某圆形区域 P,其中心位于(25.83°N,123.75°E),其它区域的轨道设计方法类似。椭圆轨道近地点幅角  $w$  的平均变化率为:

$$dw/dt = (3/4)n_0AJ_2(5\cos^2i - 1) \tag{1}$$

式中: $i$  为轨道倾角; $J_2$ 、 $n_0$ 、 $A$  均不为 0。当  $w$  的变化率不为 0 时,卫星轨道会出现远地点飘移。为克服这一问题,令上式为 0,解得轨道倾角  $i$  为 63.4°或 116.6°。而当  $i > 90^\circ$  时不利于卫星的发射,故选择  $i$  为 63.4°。

如果小卫星的星下点每日重复,就可以方便地根据其运行情况进行控制和分析,因此本文采用椭圆回归轨道。设定小卫星回归周期  $T$  为 1/4 个恒星日,根据开普勒第三定理:

$$a = \sqrt[3]{\frac{T^2 \mu}{4\pi^2}} \tag{2}$$

式中  $\mu$  为开普勒常数,得出卫星轨道半长轴  $a$  为 16 733.4 km。

为避开可能对星载设备造成损害的范·阿伦辐射带,远地点高度应位于 8 000 - 15 000 km<sup>[5]</sup>。考虑回归轨道的要求以及半长轴和远地点高度的取值范围,令离心率  $e$  为 0.273 7,并设定近地点幅角  $w$  为 270°。为达到较好的覆盖性能,还需对升交点赤经  $\Omega$  和真近点角  $f_c$  进行设计。参考文献[6]、[7],得到  $\Omega$  为 144°,  $f_c$  为 55°。利用上述椭圆轨道,卫星每天运行 4 圈以后回归。单颗卫星对目标区域的平均覆盖率为 37.67%。

为了提高卫星对目标区域的连续访问时间,考虑增加中椭圆轨道平面内的卫星数量。但根据以上讨论,仅用一个轨道面并不能显著地增加对目标区域的覆盖时间,且对于军事通信来说抗毁性较差,因此采用多颗分布在不同轨道面的小卫星进行区域覆盖。根据轨道设计的原则,在保证对目标区域最大覆盖率的前提下使用最少的卫星,且使升交点赤经尽量等间隔分布,轨道设计结果如表 1 所示。

表 1 小卫星星座轨道参数设计结果

Tab. 1 Design result of small satellites' orbit parameters

	$a/\text{km}$	$e$	$i/(\text{°})$	$w/(\text{°})$	$\Omega/(\text{°})$	$f_c/(\text{°})$
1					140	55
2	16 733.4	0.273 7	63.4	270	106	232
3					320	290
4					6	110

### 1.2 小卫星星座对目标区域的视距覆盖性能

利用 STK 软件<sup>[8]</sup>,用表 1 中的小卫星星座对目标区域进行视距覆盖,具体情况见图 1。

从图中可以看出,小卫星中继平台对目标区域的平均覆盖率 99.41%。其中未完全覆盖的时段为 18:19 - 18:21,22:39 - 22:51,累计时间仅为 16 min。可见该星座对于目标区域具有良好的覆盖性能。

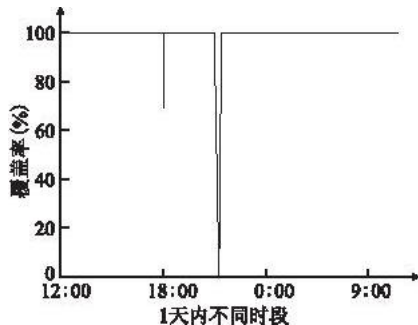


图 1 1 天内小卫星星座对目标区域的覆盖情况

Fig. 1 Coverage condition of small satellite constellation to target area of a day

## 2 通信链路收发参数的设计

### 2.1 系统通信链路的建立

实现对目标区域的连续覆盖后,要想保证地面站和飞机的通信畅通,还需对地面站和小卫星之间进行通信链路的建立<sup>[9]</sup>。根据地面站和目标区域的位置可以分为 2 种情况:一是目标区域离地面站较近,小卫星能同时覆盖地面站和目标区域,可以直接建立地面站 - 小卫星 - 飞机通信链路;二是目标区域离地面站较远,小卫星在覆盖目标区域的同时不能覆盖地面站,可利用“天链 1 号”地球同步卫星进行二次中继,建立地面站 - 中继卫星 - 小卫星 - 飞机通信链路。

为节省卫星能量,所有卫星采用间歇式工作,因此,卫星工作时段切换有以下 2 种设计思路:一是主动式工作模式。根据卫星运动的规律,事先将工作时间参数输入卫星,但定时自主控制系统可能出现时间漂移,影响系统的可靠工作;二是被动式工作模式。利用“天链 1 号”卫星控制多颗小卫星,当小卫星进入指定

工作空间时,“天链1号”卫星下达工作命令,当小卫星离开指定工作空间时,下达停机命令。这种方式不受卫星轨道摄动微小变化影响,因此建议在工程应用中采用该工作模式。

## 2.2 收发参数的设计

信号经卫星信道传输,会受到自由空间传播损耗和链路附加损耗的影响。为保证小卫星地空超视距通信的有效性,需要在研究卫星信道特性的基础上设计链路的发射、接收参数。自由空间损耗为:

$$L_f = \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (3)$$

式中: $d$ 为卫星到用户的距离; $f$ 为通信所用频率; $c$ 为光速。从上式可以看出, $L_f$ 与 $d^2$ 和 $f^2$ 成正比。

链路附加损耗主要包括雨衰、大气吸收损耗以及由于折射、电离层闪烁等引起的损耗。雨衰是指降雨引起的电波传播损耗,损耗的大小随频率的增大而增大,一般在Ku频段以上雨衰的影响不能忽视;大气中的 $O_2$ 和 $H_2O$ 等分子对电波产生吸收作用叫做大气吸收损耗,从总体上看,损耗随频率的增大而增大;电离层闪烁的强度大致与频率的平方成反比,会对低频段尤其是1GHz以下的电波产生明显的散射和折射;对流层降雨和闪烁特性主要对较高频段的电波传播造成较大影响,特别是在低仰角时,衰落可达10dB。

根据国际电信联盟对频率的分配情况,设定卫星与飞机链路的通信频率为UHF波段,卫星与地面站的通信频率为C波段。由于所用频段小于10GHz,故不考虑雨衰的影响。气体吸收模型选择国际电信联盟建议的ITU-R P676.5模型,设定衰落储运损耗为0.1%,折光梯度小于100N/km的时间为10%。

利用STK软件的RF Environment模块添加自由空间传播损耗和链路附加损耗模型,并参考Orbcomm卫星系统<sup>[10]</sup>发射接收参数的设计,设定地面站、卫星、飞机的接收机增益分别为28dB,7dB,2dB,发射机参数见表2。

表2 发射机参数的设计结果

Tab.2 Design result of transmitter parameters

发射机	频率/GHz	EIRP/dBW	调制方式
机载发射机	0.4	15	
卫星-飞机	0.3	18	QPSK
地面站发射机	6	38	
卫星-地面站	5	18	

## 3 通信效能仿真分析

本节利用STK软件建立地空超视距通信仿真模型,从观测仰角和链路误码率2个方面对系统进行通信效能评估。仿真环境设置如下:目标区域为直径为400km的圆形区域P,地面站位于目标区域以外的某点Q(25°N,118°E),4颗小卫星组成的星座(见表1)作为通信中继。飞机于12:00从地面站出发,以611.2km/h的速度到达目标区域,于次日11:01回到地面站,仿真时间为12:00-次日12:00。假定小卫星间不存在星间链路,小卫星远程地空超视距通信系统需要保证飞机与地面站的通信畅通。

### 3.1 系统观测仰角仿真

观测仰角是指用户或地面站与卫星的连线和用户或地面站所在位置切线之间的夹角。当观测仰角较低时,信号受大气层、阴影效应等的影响较大,造成通信质量降低。因此一般要规定最低通信仰角,当观测仰角大于最低通信仰角时卫星才能实现通信。这里设置最低通信仰角为5°。

利用STK相关工具,生成1天内目标区域对卫星的平均观测仰角情况,见图2。

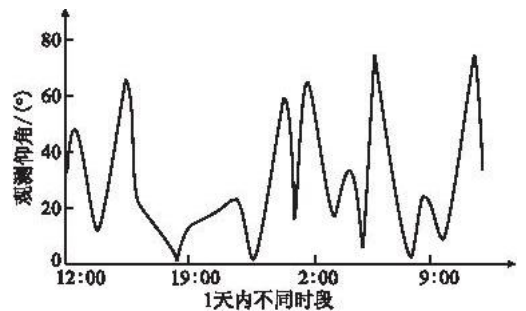


图2 1天内目标区域观测仰角变化情况

Fig.2 Elevation condition to target area of a day

从图中可以看出,目标区域1天内的平均观测仰角小于5°的时间为69min。对于该具体的仿真场景,由于假定小卫星之间没有星间链路,因此在同一时刻飞机和地面站对卫星的观测仰角均大于5°时才能进行通信。经计算,能够达到这一要求的时间占93.8%。

### 3.2 场景误码率性能仿真

根据表2设计的链路发射接收参数,得到该场景下1天内误码率情况,见表3。

表3 链路误码率情况  
Tab.3 Link bit error rate condition

链路	机-星	星-机	地-星	星-地
误码率	18:5-18:34	18:05-18:34	18:26-18:38	18:26-18:38
高于 $10^{-3}$	22:36-22:58	22:36-22:58	22:33-22:42	22:36-22:41
时间段	次日 1:09-1:14	次日 1:09-1:14	次日 1:06-1:17	次日 1:06-1:20
	4:49-5:10	4:49-5:10	4:44-5:13	4:44-5:13
	7:45-8:00	7:45-8:00		

从表中可以看出,上行链路和下行链路误码率情况并不完全一致,这是因为不同链路所用通信频率以及收发参数不同,信号经过卫星信道后的衰落情况也就不同。根据小卫星区域覆盖情况、观测仰角、误码率仿真可以得出,1天内不能进行通信的时间段为 18:05-18:32,22:36-22:58,次日 1:06-1:20,4:44-5:13,7:45-8:00,累计时间为 108 min。因此,该系统对此场景下的地空超视距通信综合效能达到。

### 3.3 分析

1) 为研究方便,仿真时假设小卫星间不存在星间链路,实际上,若小卫星间存在链路,在一颗小卫星没有同时覆盖飞机和地面站时,可以通过其它小卫星将信息进行二次中继转发,但信号在星间链路也存在衰落<sup>[11]</sup>。

2) 从观测仰角仿真可以看到,目标区域的平均观测仰角较低,这是因为椭圆回归轨道的轨道倾角、偏心率等参数受到一定约束,使得纬度越低,观测仰角越低,对通信性能有一定的影响。但本文目标区域的纬度较低,也只用了4颗小卫星就实现了目标区域99%以上的覆盖率,体现了椭圆轨道对区域覆盖的优越性。随着卫星技术和信道技术的不断发展,低仰角对通信质量的影响会越来越小。

3) 以上方案通信效能为92.5%,总体效费比较高。如果还需增加通信时间,可以对参数进行优化设计或者增加小卫星数目,也可以根据作战通信需求采取多种通信手段联合的方式提高通信覆盖率。

## 4 结束语

当前,远程地空通信受到各国的广泛重视,本文采用分布在多椭圆轨道平面的小卫星作为中继,建立了飞机-地面站的超视距通信链路,并根据卫星信道链路传播特性设计了链路的发射接收参数。仿真结果表明,该方案区域覆盖效果好,在考虑通信仰角等因素的前提下,通信效能达到90%以上,能够有效解决传统地空通信通信距离受视距制约的问题。

当然,本文仿真环境设置较为理想,在实际工程中,还需考虑通信时延、通信容量、天气对通信效果的影响等因素,因此仍需进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] 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 communications technology, 2006, 27(2): 77-80. (in Chinese)
- [2] 蔡志浩,郑宏涛,李妮,等. 卫星移动通信星座系统的建模/仿真[J]. 系统仿真学报,2006,18(S2):1-4.  
CAI Zhihao, ZHENG Hongtao, LI Ni, et al. Modeling/simulation in satellite constellation of mobile communication system [J]. Journal of system simulation, 2006, 18(S2): 1-4. (in Chinese)
- [3] 王启宇,袁建平,朱战霞. 对地观测小卫星星座设计及区域覆盖性能分析[J]. 西北工业大学学报,2006,24(4):427-430.  
WANG Qiyu, YUAN Jianping, ZHU Zhanxia. Exploring constellation coverage of China[J]. Journal of northwestern polytechnical university,2006,24(4): 427-430. (in Chinese)
- [4] 李波,毛玉泉,杨霄鹏,等. 基于地空通信的单轨小卫星组网轨道特性研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(5):50-54.  
LI Bo, MAO Yuquan, YANG Xiaopeng, et al. Study of orbit characters of single orbit small satellite net used in ground-air communication[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition, 2011, 12(5): 50-54. (in Chinese)
- [5] 吴昊,陈树新,张衡阳. 基于小卫星中继的远程通信方案[J]. 电讯技术,2012,52(4):452-455.

- WU Hao, CHEN Shuxin, ZHANG Hengyang. A remote communication scheme based on small satellite relay[J]. Telecommunication engineering, 2012, 52(4): 452 - 455. (in Chinese)
- [6] 张雅声,张育林. 一种有效的中椭圆轨道卫星星座设计与分析[J]. 装备指挥技术学院学报,2006, 17(4): 42 - 47.  
ZHANG Yasheng, ZHANG Yulin. Design and analysis of an effective medium ellipse orbit satellites constellation[J]. Journal of the academy of equipment command & technology, 2006, 17(4): 42 - 47. (in Chinese)
- [7] 吴久银,甘仲民,朱德生. 共地面轨迹移动卫星通信星座设计[J]. 电子学报,1999, 27(6): 88 - 90.  
WU Jiuyin, GAN Zhongmin, ZHU Desheng. Design of mobile satellite communications constellations with common ground track[J]. Acta electronica sinica, 1999, 27(6): 88 - 90. (in Chinese)
- [8] 邓晶,张明智,李志强,等. 基于 STK 的信息作战态势三维可视化表现方法研究[J]. 系统仿真学报,2010, 22 (11): 2654 - 2659.  
DENG Jing, ZHANG Mingzhi, LI Zhiqiang, et al. Research on 3 - D visualization in exhibition of information operation situation based on STK[J]. Journal of system simulation, 2010, 22 (11): 2654 - 2659. (in Chinese)
- [9] LI J Montesinos, Besson O. Adaptive beamforming for large arrays in satellite communications systems with dispersed coverage [J]. IET communications, 2011, 5(3): 350 - 361.
- [10] 张艳娥,张更新,李连涛. 星座通信卫星[J]. 卫星与网络,2007,8(9): 58 - 61.  
ZHANG Yan'e, ZHANG Gengxin, LI Liantao. Constellates communications satellites[J]. Satellite & network, 2007, 8(9): 58 - 61. (in Chinese)
- [11] Liu X. Source - induced fading of a multiple - input - singleoutput optical satellite communication system described by beta functions[J]. IET optoelectronics, 2011, 5(1): 28 - 35.

(编辑:徐楠楠)

## Design and Effect Simulation on Small Satellite Remote Ground - air Communication System

WU Hao, CHEN Shu - xin, HUO Chen - jie, ZHANG Heng - yang

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** To solve the problem of out - of - sight communication in remote ground - air communication, an out - of - sight air - ground communication scheme is proposed, which is relayed by multi - elliptical orbits small satellites. At first, orbit parameters of small satellites are designed and average coverage rate of target area is certified 99.41% by using medium ellipse orbit constellation which consists of 4 satellites. Then work principle and link propagate characteristic of out - of - sight air - ground communication system is studied and link transceiver parameters are designed on that basis. The simulation results show that the use of the proposed system in communication is without distance limit, and the system has the advantages of good communication effect, good anti - destroyed performance and low cost.

**Key words:** ground - air communication; area coverage; elliptic orbit; communication coverage; STK