

文章编号: 2095-4980(2018)02-0227-06

导航星座对高轨特定目标导航方法

张宏杰, 韦欣荣, 曹 锦, 胡 伟, 王万斌

(中国空间技术研究院 总体部, 北京 100094)

摘 要: 针对当前各种高轨飞行器对导航需求日益增强的情况, 提出一种导航星座对高轨特定目标飞行器进行导航的方法。该方法需要在导航星座卫星配备全数字相控阵天线与指向可调的高增益导航天线。相控阵天线接收目标飞行器发射的用于波达方向(DOA)估计的信号, 并对该信号的DOA进行估计, 使距飞行器较近的多个导航星座卫星估计得到飞行器相对于自身的相对方向。以该方向为基础, 导航卫星可以调节自身的高增益导航天线并使其指向特定目标飞行器, 发送导航电文信息, 从而使导航星座自主实现对高轨目标飞行器的导航任务。假定导航卫星相控阵天线装配于卫星对天面上, 以此为基础对同步轨道的目标飞行器同导航星座各卫星相控阵天线的可见性进行了仿真分析, 并在目标可见的基础上对二维DOA估计精确度进行了计算, 验证了方法的可行性。

关键词: 波达方向; 导航; 相控阵天线; 高轨

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0227

Navigation method to high orbit target for navigation constellation

ZHANG Hongjie, WEI Xinrong, CAO Jin, HU Wei, WANG Wanbin

(Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In view of the increasing demand for various kinds of high orbit aircraft navigation, a navigation method is proposed for high orbit specific targeted aircraft. The method requires a full digital phased array antenna and a high gain navigation antenna with a tunable high gain antenna in the navigation satellite. Phased array antenna receives the signal of target vehicle launched for the Direction of Arrival(DOA) analysis and estimates the signal DOA, as well as the direction of the aircraft relative to its own by the multiple navigation satellites. Based on this direction, the navigation satellite can adjust its high gain navigation antenna and make it point to a specific target aircraft, and transmit the navigation message, so as to realize the navigation task of the high orbit spacecraft. In this paper, the navigation satellite phased array antenna is assumed to have the visibility of the satellite phased array antenna on the surface of the satellite. Based on the target, the accuracy of the two dimensional DOA estimation is calculated. The feasibility of the method is verified.

Keywords: Direction of Arrival(DOA); navigation; Phased Array Antenna(PAA); high earth orbit

卫星导航是利用卫星播发的特定信号完成目标体导航、定位和授时的活动。卫星导航系统已成为社会经济发展、国家安全的天基时空基准与重要战略基础设施, 具备强大的导航、定位和授时能力, 集中体现国家科技、经济、工业和军事实力, 并显著提升国际威望和政治、经济、军事影响力。已建或在建的卫星导航系统包括美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、俄罗斯的全球卫星导航系统(GLObal Navigation Satellite System, GLONASS)、欧洲的伽利略卫星导航系统与中国北斗导航系统。地球静止轨道卫星(Geostationary Earth Orbit-Satellite, GEO)与高偏心轨道卫星(Highly Eccentric Orbital Satellite, HEO)等高轨卫星在陆地与海洋通信、跟踪与数据中继、导弹预警、气象探测、电视直播、教育应用、灾难预警等方面都有着很重要的用途^[1-4]。当前星座导航卫星大部分采用中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星, 其覆盖范围被限定于 MEO 至地面的空间, 超出该空间的高轨空间则无法提供长期有效的导航服务。文献[1]针对全球卫星导航系统用于高轨卫星导航存在的导航信号弱, 可见卫星少, 定位几何差等问题, 提出一种在 GPS 导航星冲天面安装导航天线并辐射导航信号的

方法,但该方法灵活性较差。本文提出一种导航星座对高轨特定飞行器通过波达方向(DOA)估计其相对方向,采用指向可调高增益导航天线的方法实现高轨目标导航。该方法的优点在于其可以针对特定目标进行主动导航,从而对星座导航信号覆盖范围外的飞行器进行导航,扩展导航星座的覆盖范围。由于导航信号通过高增益导航天线发送,链路增益高,可覆盖范围广。

1 高轨特定目标导航原理

基于来波方向估计的导航星座对高轨特定目标导航方法,是对全球导航星座功能进行功能扩展、性能增强的一种方法,需要对星座各卫星在不影响当前导航功能与性能的基础上,适当增加硬件资源(包括可用于 DOA 估计的相控阵天线与数字信号处理单元,用于发送主动导航信号的指向可调高增益导航天线)。

为实现主动导航,目标飞行器与导航卫星间需要建立一套用于 DOA 估计的信号体系(可同飞行器的测控信号、遥测信号或者跟踪信号复用)。该信号一般要求目标飞行器在飞行过程中一直全向辐射或者可覆盖多个导航卫星,使导航星座卫星可实时通过 DOA 估计,实现对目标飞行器的方位估计,进而调整自身装配的高增益、指向可调导航天线指向目标飞行器,对其进行主动导航,原理示意图见图 1。

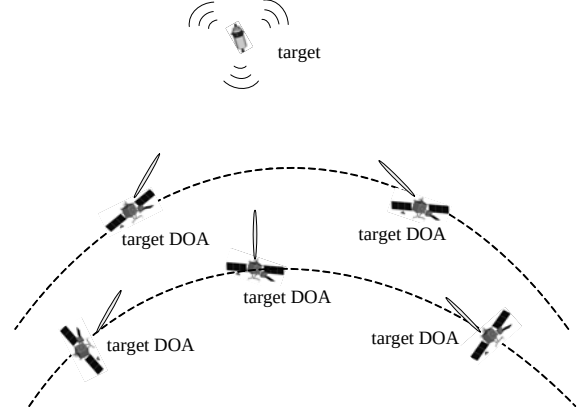


Fig.1 Navigation method of high orbit target
图1 高轨导航方法示意图

导航卫星对高轨目标飞行器的到达信号方向估计的方法称为DOA估计,该阵列信号处理技术在过去30年内得到广泛发展,是现代信号处理的一个重要研究分支,其应用涉及到雷达、通信、声呐、射电天文等多种领域^[5]。

DOA估计技术大多数情况下是针对信号一维参数估计其方向角,而多维参数估计更适合实际工程环境,如二维DOA估计(方位角与俯仰角)、信号频率与二维DOA的联合估计等。二维DOA估计一般采用面阵或立体阵来实现二维参数的估计,本文采用面阵实现二维DOA估计。与一维参数估计算法相同,二维参数估计算法也可以分为多重信号分类(MULTIPLE Signal Classification, MUSIC)算法、ESPRIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)算法等。其中MUSIC与子空间拟合算法,可以得到渐近无偏估计的高分辨力估计性能^[5-6],本文采用MUSIC方法进行空间谱估计。

1.1 DOA 估计原理

二维DOA估计^[5]的空间信号模型,设面阵在水平面上均匀排成 M 行 L 列($M \geq 1, L \geq 1$),阵元数记为 ML ,阵元的行、列间距相等且均为信源波长的一半,即 $d = \lambda/2$,用它来估计 I 个不相关的远场窄带信源,信源的中心频率为 ω_0 。令第 i 个信源的仰角与方位角为 (φ_i, θ_i) , $y(t)$ 为观测信号, $s(t)$ 为源信号, $\mathbf{A}$ 为信号的导向矢量矩阵,二维DOA估计的几何模型见图2。

若以阵元(1,1)为参考阵元,则阵元 $p(m,l)$ 所接收的信号 $y_{ml}(t)$ 见式(1):

$$y_{ml}(t) = \sum_{i=1}^I s_i(t) e^{-j\omega_0 \tau_{ml}(\varphi_i, \theta_i)} + n_{ml}(t) \quad (1)$$

式中: $t=1,2,3,\dots,N$ (N 为采样点数); $\tau_{ml}(\varphi_i, \theta_i) = (m-1)\frac{\lambda}{2c} \cos \varphi_i \cos \theta_i + (l-1)\frac{\lambda}{2c} \cos \varphi_i \sin \theta_i$; $n_{ml}(t)$ 为阵元 $p(m,l)$ 所接收的噪声。将式(1)写成向量形式:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_{ML}(t)]^T_{ML \times 1}$; $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_I(t)]^T_{I \times 1}$; $\mathbf{N}(t) = [n_{11}(t), n_{12}(t), \dots, n_{ML}(t)]^T_{ML \times 1}$; $\mathbf{A} = [a(\varphi_1, \theta_1), a(\varphi_2, \theta_2), \dots, a(\varphi_I, \theta_I)]_{ML \times I}$; $a(\varphi_i, \theta_i) = [e^{j\omega_0 \tau_{11}(\varphi_i, \theta_i)}, e^{j\omega_0 \tau_{12}(\varphi_i, \theta_i)}, \dots, e^{j\omega_0 \tau_{ML}(\varphi_i, \theta_i)}]^T_{ML \times 1}$ 。

1.2 MUSIC 方法空间谱估计原理

MUSIC方法对信源参数的估计是一种基于特征结构的超分辨力估计方法,根据式(2),则接收阵列输出的样本协方差矩阵 $\mathbf{R}_X$ 为: $\mathbf{R}_X = E[\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H] = E[\mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t)][\mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t)]^H$ 。

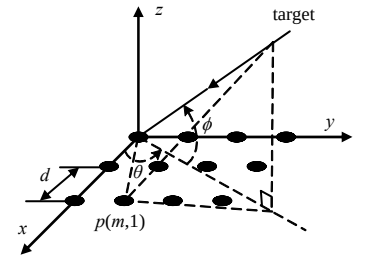


Fig.2 Geometrical configuration of 2D-DOA
图2 二维 DOA 估计的几何模型

在实际情况下,通常假设源信号之间以及信号与噪声之间互不相关, $\sigma_n^2 = n_{ii}(t)^2$ 为噪声功率,则可将馈源阵列输出的协方差矩阵公式简化为式(3):

$$\mathbf{R}_X = \mathbf{A}E[\mathbf{S}\mathbf{S}^H]\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} = \mathbf{A}\mathbf{R}_S\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}_S = E[\mathbf{S}\mathbf{S}^H] = E\left[\begin{bmatrix} s_1(t) & s_2(t) & \cdots & s_L(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) & s_2(t) & \cdots & s_L(t) \end{bmatrix}^H\right]$;

$$\sigma_n^2\mathbf{I} = E[\mathbf{N}\mathbf{N}^H] = E\left[\begin{bmatrix} n_{11}(t) & n_{12}(t) & \cdots & n_{ML}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{11}(t) & n_{12}(t) & \cdots & n_{ML}(t) \end{bmatrix}^H\right]。$$

对 $\mathbf{R}_X$ 进行特征分析,可以得到矩阵 $\mathbf{R}_X$ 的信号子空间 E_S 与噪声子空间 E_N 。理想状态下,信号的噪声子空间与信号子空间是相互正交的。由于信号子空间与信号的导向矢量相对应,可得 $\mathbf{a}(\varphi_i, \theta_i)E_N = 0$ 。

实际中,天线阵接收到的数据都是有限长度的,而且存在噪声, $\mathbf{a}(\varphi_i, \theta_i)E_N$ 的值通常为接近于0的正数。连续对每个阵元进行 N 次快速采样(N 次快拍),形成 N 个输出矩阵,对其协方差矩阵的估计: $\hat{\mathbf{R}}_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{Y}\mathbf{Y}^H$ 进行特征值分解,得到由大特征值对应的信号子空间估计值 $\hat{E}_S$, 由小特征值对应的噪声子空间估计值 $\hat{E}_N$ 。根据MUSIC的谱估计公式计算二维功率谱: $P_{\text{MUSIC}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\varphi_i, \theta_i) \hat{E}_N \hat{E}_N^H \mathbf{a}(\varphi_i, \theta_i)}$ 。得到二维功率谱后,进行谱峰搜索,由于对应信号的 φ_i, θ_i , $\mathbf{a}(\varphi_i, \theta_i)E_N \approx 0$, 因此在功率谱上会形成明显的谱峰,由此即可判读出信号的方位角 θ 与俯仰角 φ 。

1.3 算法仿真

仿真中,假设目标飞行器发射的信号为S频段的单载波信号,发射功率为10 W,天线增益为-10 dBi,距离导航卫星为42 000 km,信噪比为3 dB(假定目标飞行器发射的有效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)为30 dBm,星上相控阵天线处理增益为30 dBi,相控阵天线的噪声系数为6 dBi)。采用MUSIC方法,假定相控阵天线采用均匀面阵,阵元数为 $M=6, L=6$,阵元间距 $d=\lambda/2$, 2个远场窄带信源的方位角与俯仰角参数为 $(\varphi_1, \theta_1), (\varphi_2, \theta_2)$,背景噪声为均值为零的高斯白噪声,信噪比设定为3 dB。

设定目标飞行器对应导航卫星的方位角与俯仰角参数为 $(30^\circ, 65^\circ), (60^\circ, 40^\circ)$ 时的仿真结果见图3和图4。设定目标飞行器对应导航卫星的方位角与俯仰角参数为 $(5.1^\circ, 5.0^\circ), (5.0^\circ, 5.1^\circ)$ 时的仿真结果见图5和图6。

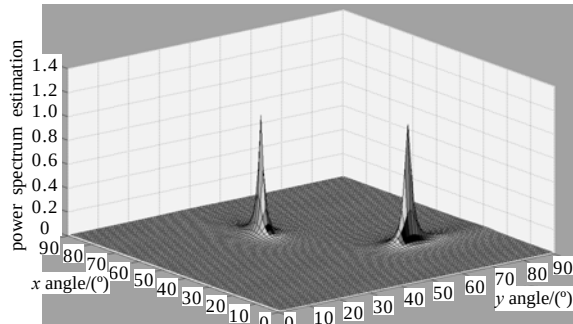


Fig.3 DOA estimation map((30°,65°),(60°,40°))
图3 DOA估计谱((30°,65°),(60°,40°))

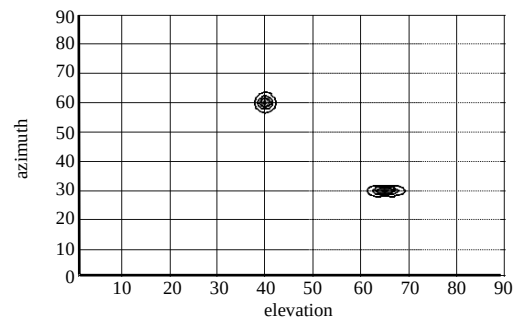


Fig.4 Contour line((30°,65°),(60°,40°))
图4 DOA估计谱等高图((30°,65°),(60°,40°))

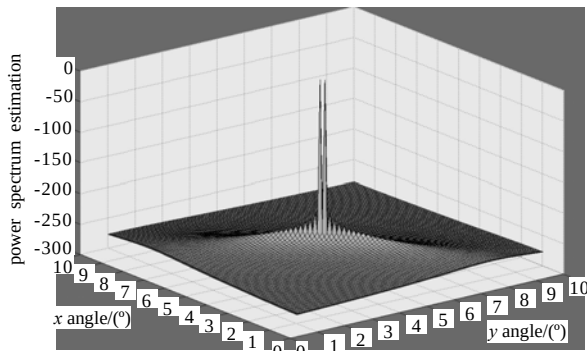


Fig.5 DOA estimation map((5.1°,5.0°),(5.0°,5.1°))
图5 DOA估计谱((5.1°,5.0°),(5.0°,5.1°))

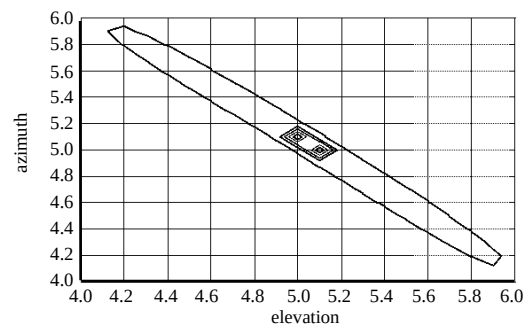


Fig.6 Contour line((5.1°,5.0°),(5.0°,5.1°))
图6 DOA估计谱等高图((5.1°,5.0°),(5.0°,5.1°))

1.4 仿真结果分析

由仿真结果可见, 基于 MUSIC 方法的二维 DOA 估计可以正确估计出来波的方位角与俯仰角, 分辨力优于 0.2° , 卫星的高增益定向天线主波束角一般大于 1° , 因此这一精确度完全可以使导航天线主波束覆盖目标。如果存在同一方向有较多个目标不能分辨的情况, 此时只要有一个较大的信号被估计出来, 则天线主波束角可以同时覆盖该方向内的所有目标, 不会产生遗漏目标的情况。该仿真中, 对 DOA 估计影响较大的是星载相控阵天线接收目标信号的信噪比, 为保证估计精确度, 在目标导航卫星距离导航星座卫星的距离超过仿真距离时, 需要通过增加发射功率或者天线增益的方法, 提高 EIRP 值, 保证估计精确度。

传统的 DOA 估计主要用于相控阵雷达等领域, 由于目标位置变化快, 因此对实时性要求很高。分辨力较高的算法由于需要进行多次的矩阵求逆以及多维峰值搜索, 计算量大, 需要大量的硬件资源保证实时性; 同时分辨力较高的算法为获得较高的分辨力, 损失了一定的稳定性, 在地面应用时, 也易受到多径、散射信号等影响^[7-9]。相比地面应用的这些不利影响因素, 由于需要导航的飞行器一般离导航卫星较远, 且位置相对导航卫星为均匀慢变, 高增益导航天线的主波束角范围远大于 DOA 估计的分辨力, 对实时性要求相比地面应用较低; 同时由于信源方位为慢变, 因此在进行方位估计时可以分次估计: 先进行一次粗估计, 在粗估计基础上, 缩小扫描范围、提高精确度进行重新估计, 可以在保证估计精确度的情况下有效减少计算量。在时间允许的情况下也可以用一个相控阵天线在完成 DOA 估计时, 同其他功能复用, 空间环境为近真空状态, 目标飞行器背景为空间环境, 无杂散波干扰, 也为 DOA 估计提供了天然的优势。

2 高轨特定目标与导航星座的可见性分析

导航卫星通过相控阵天线实现目标飞行器的 DOA 角度估计, 需要目标飞行器在其天线覆盖范围内。为分析特定目标飞行器与导航星座相控阵天线的可见性, 需建立导航星座模型。仿真模型采用 3 个 MEO 轨道, 每个轨道上平均分布 8 个卫星的星座结构, 轨道高度为 2.2×10^4 km, 高轨目标飞行器高度为 3.8×10^4 km 的高轨道, 在高轨道球面上均匀取点, 代表高轨目标飞行器。

在该模型中, 由于导航信号通过高增益导航天线发送, 链路增益高, 可假设无线链路均满足使用要求, 因此影响导航星座卫星与高轨目标可见性的因素主要为相控阵天线覆盖范围的半锥角。要实现高轨目标的导航, 至少需要 4 颗卫星同时可见, 仿真模型见图 7(a)。分析中采用不同的半锥角进行计算, 图 8 为在半锥角 80° , 每个点大于 80% 时间覆盖情况下的分析结果, 中间深色区域为 3 颗卫星同时可见, 其他颜色为大于等于 4 颗。由图 8 可以看出, 由于星座特性, 在赤道附近可见性较差, 只有 3 颗(蓝色区)导航卫星可见, 极地附近可见性较好, 可实现 5 颗以上(灰色区)导航卫星可见, 其余部分空间可实现 4 颗(绿色区)以上导航卫星可见, 因此在该星座结构下, 该方法具备有可行性, 但在赤道附近覆盖性较差。

在 GEO 轨道有大量同步轨道卫星工作, 为提高覆盖性, 仿真中采用增加卫星相控阵天线数量的方法扩大其覆盖范围, 具体方法是将 2 部相控阵天线斜装, 每部天线的覆盖区半锥角为 70° , 2 部天线斜装在卫星背天面上, 相控阵天线背面同卫星背天面的夹角为 50° , 这样可以保证 2 个天线的波束刚好不重叠。其仿真模型见图 7(b), 该情况下覆盖范围的仿真最差结果见图 9。可以看出, 在全部时间内, 所有位置均可以达到有 4 颗以上卫星可见, 导航卫星通过指向过调的高增益导航天线发送的导航信号可以全部覆盖满足链路需求的高轨空间。

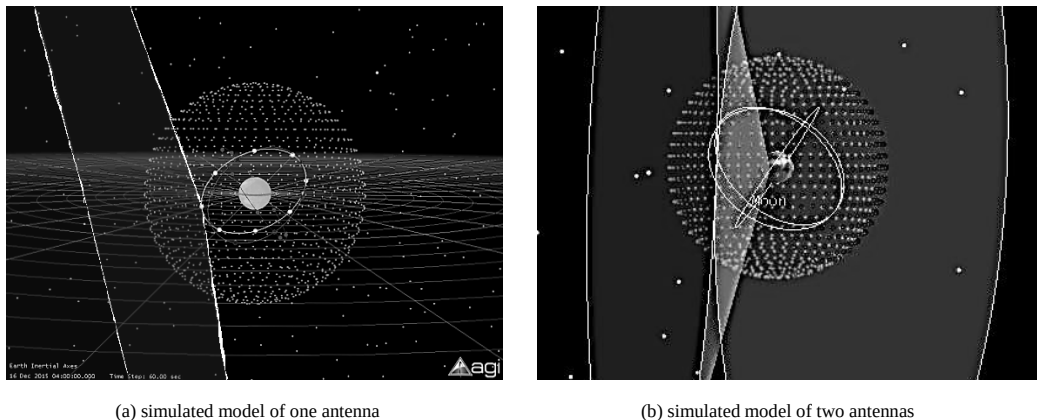


Fig.7 Simulated model of one/two antenna

图 7 单/双相控阵天线仿真模型

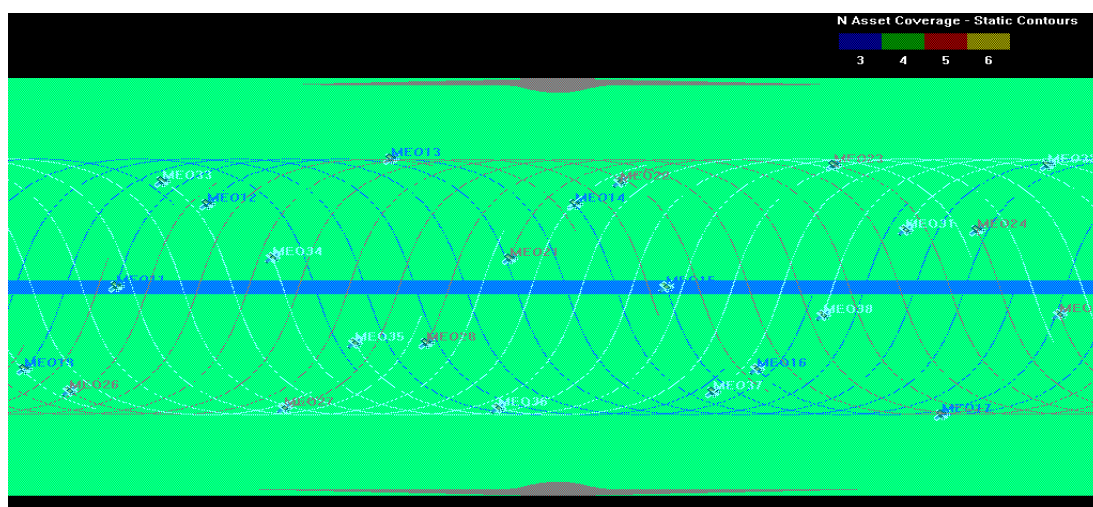


Fig.8 Simulated results of one antenna

图8 单相控阵天线可见性分析结果

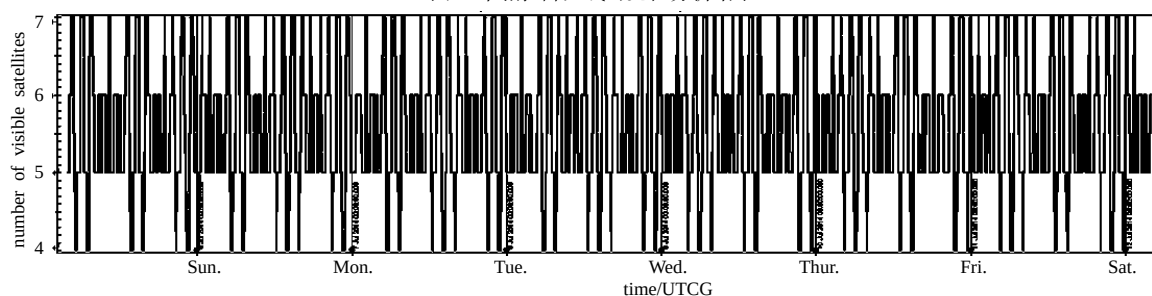


Fig.9 Simulated results of two antennas

图9 双相控阵天线可见性分析结果

3 结论

本文提出一种基于 DOA 估计的导航星座对高轨特定目标飞行器进行导航的方法,参考卫星在实际应用中的真实参数,采用 MUSIC 算法对二维 DOA 估计分辨力进行计算分析,并对高轨特定目标与导航星座的可见性进行建模与仿真,验证了方法的可行性。本方法是对导航星座覆盖范围在高轨空间的一种有效扩展,优点在于利用该方法导航星座,可以自主针对特定目标进行主动高轨导航,不影响导航星座当前的基本功能,特别是在强电子对抗情况下,导航星座可有效自主地进行高轨重点飞行器的导航,从而可保证高轨重点目标的精确导航。本文只对方法的可行性进行了分析,后续将重点对空间信号链路情况、深空目标导航的可行性进行研究。

参考文献:

- [1] 何清举,孙前贵. 利用 GNSS 实现高轨卫星自主导航的新方案[J]. 飞行器测控学报, 2010,29(1):7-11. (HE Qingju, SUN Qiangui. A new solution of autonomous navigation for GEO satellites based on GNSS[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2010,29(1):7-11.)
- [2] 闻长远,岳富占. 高轨环境下 BDS 弱信号跟踪技术研究[J]. 飞行器测控学报, 2013,32(4):363-370. (WEN Changyuan, YUE Fuzhan. Research on tracking of high earth orbit BDS weak signal[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013,32(4): 363-370.)
- [3] WINTERNITZ L M B, BAMFORD W A, HECKLER G W. A GPS receiver for high-altitude satellite navigation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009,3(4):541-556.
- [4] DAVIS G, MOREAU M, CARPENTER R, et al. GPS-based navigation and orbit determination for the AMSAT AO-40 satellite[C]// AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Monterey, CA: [s.n.], 2002:2196-2206.
- [5] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2000. (ZHANG Xianda, BAO Zheng. Communication signal processing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.)

- [6] 石宇,高宪军,王树勋. 基于矩形面阵的信源参数和信源个数估计新方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2008,22(1):38-42. (SHI Yu,GAO Xianjun,WANG Shuxun. New algorithm for source number and parameter estimation based on planar arrays[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008,22(1):38-42.)
- [7] 景小荣,刘雪峰. L 型阵列的二维 DOA 估计方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016,28(1):24-29. (JING Xiaorong, LIU Xuefeng. Method of two-dimensional DOA estimation for L-shaped array[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2016,28(1):24-29.)
- [8] 殷勤业,邹理和. 一种高分辨二维信号参数估计方法—波达方向矩阵法[J]. 通信学报, 1991,12(4):1-6. (YIN Qinye, ZOU Lihe. A high resolution approach to 2D signal parameter estimation-DOA matrix method[J]. Journal of China Institute of Communications, 1991,12(4):1-6.)
- [9] 苏志刚,温宙. 基于空频解耦的宽带 DOA 估计算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5):765-769. (SU Zhigang, WEN Zhou. DOA estimation of wideband signal based on keystone transform[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5):765-769.)

作者简介:



张宏杰(1984-), 男, 陕西省蒲城县人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星测控、智能天线技术.email:zh_hongjie@126.com.

韦欣荣(1978-), 女, 黑龙江省虎林市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星测控总体、信号识别技术.

曹 锦(1982-), 女, 成都市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星测控、数传系统.

胡 伟(1981-), 男, 昆明市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为软件设计与工程.

王万斌(1970-), 男, 西安市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星测控技术.

(上接第 222 页)

作者简介:



管丽梅(1992-), 女, 山东省诸城市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 3D 打印及应用.email:lmguan6546459@126.com.

苗昕扬(1992-), 男, 辽宁省盘锦市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹技术与应用.

詹洪磊(1991-), 男, 贵州省铜仁市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为纳米岩石物理和 3D 打印技术.

赵 昆(1971-), 男, 山东省聊城市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为增材制造及油气光学工程.