

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.12.011

引用格式:张宇阳.低轨双星无源探测系统对运动辐射源的快速检测算法[J].电讯技术,2016,56(12):1365-1369.[ZHANG Yuyang. A fast algorithm for low earth-orbit dual-satellite passive detection system to detect moving emitters[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(12): 1365-1369.]

低轨双星无源探测系统对运动辐射源的快速检测算法*

张宇阳**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:针对时频差体制的低轨圆轨道双星无源探测系统不能对运动辐射源进行定位和辐射源是否运动进行判别问题,提出了一种通过单次观测实现运动辐射源定位与运动性判别的快速算法。该算法利用信号到达角与信号到达时差联合定位结果,结合信号到达频差对平行于大地水准面的匀速运动目标进行运动性检测,使系统在观测量存在误差条件下仍能有效进行目标运动性判别。将其应用到低轨双星无源探测系统中,仿真结果表明算法对速度大于 60 m/s 以上的辐射源具备优于 95% 的正确检测概率。

关键词:双星无源定位;运动辐射源;到达时间差;到达频率差;运动检测

中图分类号: TN97 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2016)12-1365-05

A Fast Algorithm for Low Earth-Orbit Dual-satellite Passive Detection System to Detect Moving Emitters

ZHANG Yuyang

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: A method for emitter locating and motion detecting is proposed for low earth-orbit (LEO) dual-satellite passive detection system which is unable to locate fast moving emitters when using time difference of arrival (TDOA) and frequency difference of arrival (FDOA). Motion detection is implemented automatically using FDOA measurement and location result based on angle of arrival (AOA) measurement and TDOA measurement with single observation of the emitter. The algorithm can efficiently detect uniformly moving targets which move parallelly to the geodetic level even if measurement errors exist. Numerical simulation demonstrates that the correct detection probability reaches 95% when emitters move faster than 60 m/s in LEO dual-satellite passive detection system.

Key words: dual-satellite passive localization; moving emitter; TDOA; FDOA; motion detection

1 引言

无线电监测系统最重要的一项任务就是接收舰船、车辆、飞机平台上的卫星通信上行信号、雷达信号等辐射源信号,并对这些信号进行定位或运动性判别,从而实现目标定位和动目标指示。低轨圆轨

道同轨双星是一种费效比较优的构型。当前低轨双星无源探测系统为时频差定位体制^[1-4],采用时差方程、频差方程、地球曲面方程解算实现目标的瞬时高精度定位,目标的速度没有作为未知量引入方程中。面对动目标时,方程中的信号到达频率差却包含

* 收稿日期:2016-05-17;修回日期:2016-10-17 Received date:2016-05-17;Revised date:2016-10-17

** 通信作者:ezhangyy@163.com Corresponding author:ezhangyy@163.com

了目标速度的影响,目标运动速度越快,频差方程误差越大。因此,该定位体制主要针对静止目标和慢速运动目标,对快速运动目标和空中目标不能定位。

在无线电监测中,目标是否运动是重要属性之一。针对低轨双星无源探测系统对运动辐射源进行快速运动性检测的需求,本文提出了一种基于测角、时差、频差观测量的运动辐射源检测算法,采用单次测角和时差实现运动目标的高精度定位,利用高精度定位结果和频差测量实现对平行于大地水准面匀速运动目标的运动性判定。

2 运动目标定位与检测原理

2.1 定位原理

低轨双星探测系统由 A、B 两颗卫星组成,通过测量信号到达双星时差 t_d 、到达 A 星方位角 α 、到达 A 星俯仰角 β ,可实现对目标的定位,如图 1 所示。在 A 星机体坐标系中,目标辐射源坐标为 $\mathbf{u}_b = [x_b, y_b, z_b]^T$,A、B 两颗观测卫星的位置坐标分别记为 $\mathbf{s}_{b1} = [x_{1b}, y_{1b}, z_{1b}]^T$, $\mathbf{s}_{b2} = [x_{2b}, y_{2b}, z_{2b}]^T$,由此确定机体坐标系中定位方程为

$$\begin{cases} c \cdot t_d = \sqrt{(x_b - x_{1b})^2 + (y_b - y_{1b})^2 + (z_b - z_{1b})^2} - \sqrt{(x_b - x_{2b})^2 + (y_b - y_{2b})^2 + (z_b - z_{2b})^2} \\ \alpha = \arccos\left(\frac{x_b}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2}}\right) \\ \beta = \arccos\left(\frac{z_b}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2 + z_b^2}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: c 为光速。数值方法求解式(1)^[5],可以获得目标在 A 星机体坐标系下位置。式(1)与目标速度无关,且没有用到地球曲面方程。因此,该方法可以对动目标和空中目标进行定位。

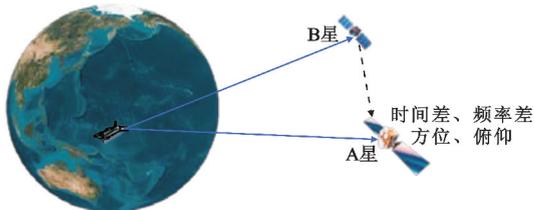


图 1 双星定位与运动状态检测原理

Fig. 1 Fundamental of dual-satellite localization and motion detection

通过坐标系转换关系^[5-6],可以获得目标在地固坐标系下的三维位置及经纬度。设机体偏航角为 ψ ,俯仰为 θ ,横滚为 φ ;A 星在地面投影的经度为

L_1 ,纬度为 B_1 ;地固坐标系下目标位置为 \mathbf{u} ;A 星位置为 \mathbf{s}_1 ;机体坐标系下目标位置为 \mathbf{u}_b ,则有

$$\mathbf{u} = \mathbf{M} \times \mathbf{u}_b + \mathbf{s}_1 \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{R}_x^T(\varphi) \cdot \mathbf{R}_y^T(\theta) \cdot \mathbf{R}_z^T(\psi) \cdot \mathbf{R}_{rg} \cdot \mathbf{R}_y(B_1) \cdot \mathbf{R}_z(L_1))^{-1} \quad (3)$$

$\mathbf{R}_x(\cdot)$ 表示绕 x 轴旋转 ω 的变换矩阵; $\mathbf{R}_y(\cdot)$ 表示绕 y 轴旋转 ω 的变换矩阵; $\mathbf{R}_z(\cdot)$ 表示绕 z 轴旋转 ω 的变换矩阵; \mathbf{R}_{rg} 为坐标转换矩阵且

$$\mathbf{R}_x(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_y(\omega) = \begin{bmatrix} \cos(\omega) & 0 & -\sin(\omega) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\omega) & 0 & \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_z(\omega) = \begin{bmatrix} \cos(\omega) & \sin(\omega) & 0 \\ -\sin(\omega) & \cos(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_{rg} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 运动性检测原理

在如图 1 所示的双星系统中,设信号频率为 f ,信号到达 A、B 两星的频差为 f_d 。在地固坐标系下,目标位置与速度记为 $\mathbf{u} = [x, y, z]^T$, $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z]^T$,A、B 两颗观测卫星的位置坐标分别记为 $\mathbf{s}_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$, $\mathbf{s}_2 = [x_2, y_2, z_2]^T$,速度矢量为 $\mathbf{v}_{s1} = [v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}]^T$, $\mathbf{v}_{s2} = [v_{x2}, v_{y2}, v_{z2}]^T$,则频差方程为

$$\left(\frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_{s1})^T (\mathbf{u} - \mathbf{s}_1)}{(\mathbf{u} - \mathbf{s}_1)^T (\mathbf{u} - \mathbf{s}_1)} - \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_{s2})^T (\mathbf{u} - \mathbf{s}_2)}{(\mathbf{u} - \mathbf{s}_2)^T (\mathbf{u} - \mathbf{s}_2)} \right) \frac{f}{c} = f_d \quad (8)$$

式中: c 为光速; f 为信号载频。

设目标在平行于大地水准面的平面上匀速运动,且在目标北东地(North-East-Down, NED)系^[7]下的航速为 v ,航向 γ 定义为与正北的夹角,顺时针方向为正。根据地固坐标系与 NED 系转换关系^[7],可以得到目标航速、航向与地固坐标系下目标的三维速度矢量的关系:

$$\mathbf{v} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{rg} \cdot \mathbf{R}_y(B_T) \cdot \mathbf{R}_z(L_T) \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

经过变换,可得

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = (\mathbf{R}_{\text{rg}} \cdot \mathbf{R}_y(B_T) \cdot \mathbf{R}_z(L_T))^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v \cos(\gamma) \\ v \sin(\gamma) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)可得目标的航速可以表示为

$$v = \frac{1}{G_0 G_1} \left(-\frac{c \cdot f_d}{f} + \frac{(u-s_1)^T v_{s1}}{r_1} - \frac{(u-s_2)^T v_{s2}}{r_2} \right), \quad (11)$$

$$G_0 = \frac{(u-s_1)^T}{r_1} - \frac{(u-s_2)^T}{r_2}, \quad (12)$$

$$G_1 = (\mathbf{R}_{\text{rg}} \cdot \mathbf{R}_y(B_T) \cdot \mathbf{R}_z(L_T))^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: r_1, r_2 分别为目标与 A、B 星直线距离; B_T, L_T 为目标经纬度,且有

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+H_T) \cos(B_T) \cos(L_T) \\ (N+H_T) \cos(B_T) \sin(L_T) \\ (N(1-e^2)+H_T) \sin(B_T) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

N 为卯酉圈曲率半径,且

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B_T}}, \quad (15)$$

a 为地球赤道半径,取 6 378 137 m; e 为偏心率, e^2 取 0.006 694 379 990 13。

理论上,当目标静止时,根据目标的位置,将航向设为任意值,代入式(11),求得航速值都为零。而当目标处于运动时,则根据式(9)遍历所有可能航向,求得的最小目标航不为 0,且目标运动速度越大,求得的最小目标航速越大。根据该原理可对目标是否运动进行判别。

3 运动状态快速检测算法

实际应用中,由于时差测量误差和测角误差的存在,求解式(1)获取的目标位置存在误差。因此,即使目标处于静止状态,根据式(11)解出的速度值将不为零。一般地,求解出的航速值大小与目标位置误差有关,位置误差越大,解出的航速值越大。另一方面,目标本身的速度越大,位置误差对正确检测目标运动性的影响越小。设置合适的门限值有助于提高正确检测概率并降低虚警概率。根据上述原理确定算法处理步骤如下:

(1)测量双星截获信号的时差 t_d 、频差 f_d ,测量主星截获信号的方位 α 、俯仰 β ,并估计时差误差 δ_t 、方位误差 δ_α 、俯仰误差 δ_β ;

(2)结合双星位置、姿态等数据,观测量 $t_d, \alpha,$

β ,采用式(1)和式(2)计算目标在地固坐标系下位置 u_e ;

(3)结合双星位置、速度数据、目标位置 u_e 、频差测量值 f_d ,采用式(11),在航向 $[0^\circ \sim 360^\circ]$ 范围时,计算不同航向对应的航速值 $\{V_k\}, k=1, 2, \dots, K$;

(4)计算最小航速值 $V_{\min} = \min\{V_k\}$;

(5)将 V_{\min} 与检测门限 V_{th} 进行比较,若 $V_{\min} > V_{\text{th}}$,则判定目标为运动目标。

门限的设置与目标位置误差有关,而目标位置误差受观测量 t_d, α, β 影响。一般地,目标的位置误差越小,检测算法对噪声越不敏感,门限 V_{th} 可以设置得较小,系统对慢速运动目标的检测能力越强。一种设计门限的方法是由观测量误差计算定位误差分布,并计算该定位分布范围内所有定位点为静止状态时的最小航速均方根值,并以 2 倍或 3 倍该均方根值作为门限,具体步骤如下:

(1)结合双星位置、姿态数据、目标位置 u_e 、时差误差 δ_t 、方位误差 δ_α 、俯仰误差 δ_β ,采用文献[2]的分析方法,计算目标位置误差协方差矩阵 $M_{\delta u}$;

(2)利用目标位置 u_e 、目标位置误差协方差矩阵 $M_{\delta u}$,计算并生成 $M_{\delta u}$ 确定的定位分布下的定位点序列 $\{u_e(k)\}, k=1, 2, \dots, N$;

(3)对序列中定位点 $u_e(k)$,设定目标速度为 0,根据式(8)计算理论频差值 $f_{dc}(k)$;

(4)结合双星位置、速度数据,以 $f_{dc}(k)$ 结合式(11),航向 $[0^\circ \sim 360^\circ]$ 范围时,计算目标在该定位点下最小航速 $V_{T\min}(k)$;

(5)重复第 3~4 步,直到完成所有定位点下最小航速,得到最小航速序列 $\{V_{T\min}(k)\}, k=1, 2, \dots, N$;

(6)统计最小航速序列 $\{V_{T\min}(k)\}$ 的均方根值 $\delta_{V_{T\min}}$,检测门限 $V_{\text{th}} = 2\delta_{V_{T\min}}$ 或 $V_{\text{th}} = 3\delta_{V_{T\min}}$ 。

理论上,当 $M_{\delta u}$ 确定的定位点为正态分布时,取 $2\delta_{V_{T\min}}$ 作为检测门限,表示系统 5% 虚警概率,取 $3\delta_{V_{T\min}}$ 作为检测门限,表示系统 1% 虚警概率。从算法原理可以看出,该算法只需要进行 1 次时频差测量和 1 次方位/俯仰测量,在工程实现中,上述参数的测量只需对信号进行 0.5 s 观测和处理就可完成,所以是一种快速方法。

4 性能仿真

4.1 仿真分析参数

采用低轨圆轨道同轨双星探测系统为辐射源快速运动检测性能分析场景,基于真实卫星在轨场景并利用卫星工具包(Satellite Tool Kit, STK)建模生

成卫星的位置、速度参数,如表 1 所示。

表 1 仿真用的卫星数据
Tab. 1 Satellites data for simulation

坐标轴	位置/km		速度/(km · s ⁻¹)	
	A 星	B 星	A 星	B 星
X 轴	7 077. 790 958	7 078. 136 998	0. 074 076	0. 000 192
Y 轴	-0. 661 511	0. 000 000	-0. 070 586	-0. 070 640
Z 轴	69. 986 455	-0. 181 151	7. 490 683	7. 491 051 1

仿真分析中,根据卫星的典型覆盖范围,设定目标位置距离双星在地面投影连线中点500 km。根据当前工程技术水平,设定测角误差 1°、0. 5°、0. 2°、0. 1°等 4 种条件,时差误差100 ns和40 ns两种条件,频差误差0. 2 Hz和0. 4 Hz两种条件。仿真过程采用蒙特卡洛仿真,为保证仿真实验结果的稳定和可靠,仿真次数 500 次。上述误差参数作为均方根误差并生成相应随机误差数据作为噪声应用到仿真实验中,根据实验结果直接统计正确检测次数,计算检测概率。

4.2 仿真结果分析

选择典型信号频率 2 GHz,该频段典型测角精度 1°和 0. 5°、时差测量精度100 ns、频差测量精度 0. 2 Hz时,正确检测概率 P_d 与目标速度 V_T 的关系如图 2 所示。

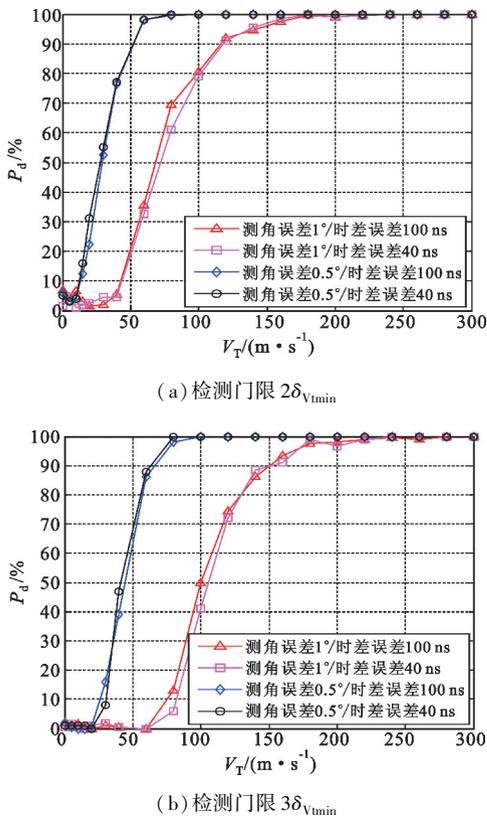


图 2 典型测角精度条件下检测性能
Fig. 2 Detection performance in typical AOA measurement error

从仿真分析结果可以看出,目标运动速度越快,正确检测概率越大。测角误差 0. 5°时,对速度大于 60 m/s 目标检测概率优于 90%,可实现对低空慢速飞行器如直升机、无人机的检测,测角误差 1°时,对速度大于150 m/s 目标检测概率优于 90%,可实现对高空快速飞行器如战斗机、民航客机的检测。在典型时差测量精度下,时差对检测性能的影响不大,测角精度对检测性能影响较大,这是因为在 40 ~ 100 ns 时差误差条件下,影响定位精度的主要因素为测角精度。经分析,测角误差 0. 5°时单次定位精度为 10 km;测角误差 1°时,定位精度单次为 20 km。定位误差越大,正确检测概率越低。另一方面,目标运动速度越大,检测算法对定位误差越不敏感。

要进一步提高对慢速运动目标的检测能力,需要提高测角精度,如测角精度为 0. 2°和 0. 1°时检测性能如图 3 所示。测角精度 0. 2°时可以实现对 30 m/s 以上运动目标的检测,测角精度 0. 1°时可以实现对 20 m/s 以上运动目标检测。

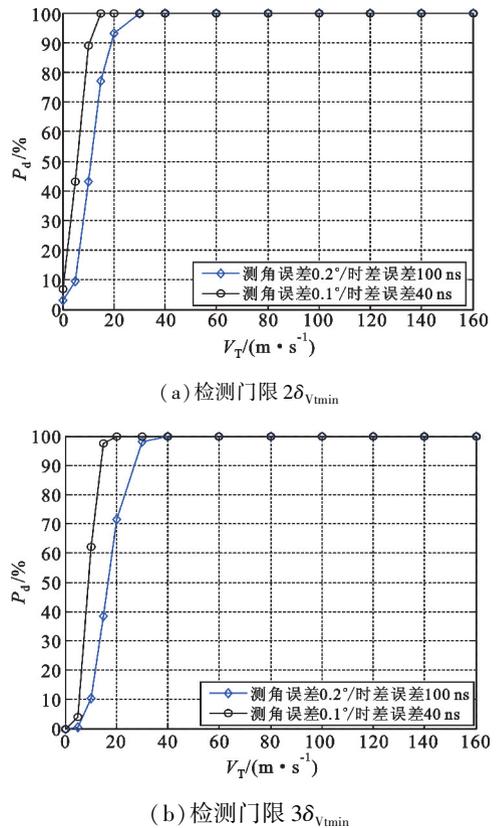


图 3 高精度测角条件下检测性能
Fig. 3 Detection performance in high-precision AOA measurement

除了测角和时差误差外,影响检测性能的另一因素就是频差测量误差。在测角精度 0. 5°、时差精度100 ns 的条件下,不同频差测量误差 δ_{fd} 对虚警

概率 P_f 的影响如图 4 所示。

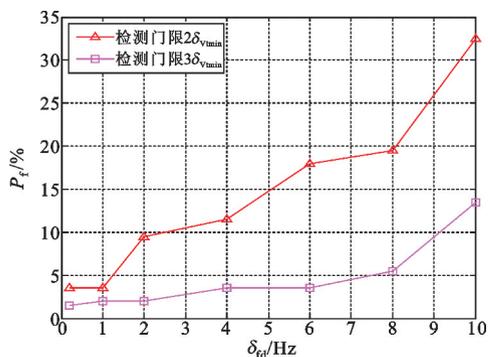


图 4 频差误差对虚警概率的影响

Fig. 4 Influence of FDOA estimation error on false alarm probability

从频差测量误差对虚警概率的仿真分析结果可以看出,采用 $2\delta_{vmin}$ 作为门限时,频差误差为 2 Hz,虚警概率达到 10%,而采用 $3\delta_{vmin}$ 作为门限时,频差误差为 9 Hz,虚警概率达到 10%。在工程应用中,要保证较好的检测结果并留取一定系统余量,频差误差应小于 1 Hz。

5 结论

针对低轨双星无源探测系统对动目标检测问题,本文利用测角和时差联合实现的高精度定位结果,结合频差观测量,建立航速、航向与频差关系方程,给出了一种运动辐射源快速检测算法。该方法通过单次参数测量就能对平行于大地水准面匀速运动目标进行运动性检测。文中给出的仿真实例说明了该方法的有效性。本文的算法目前通过单次观测能实现目标的运动性检测,但不能测速。目标的速度测量在无线电监测中具有重要意义,多次观测进行辐射源被动测速是下一步研究的内容。

参考文献:

[1] 王勤果. 双星时差频差定位体制在频域混叠电磁环境下的应用[J]. 电讯技术, 2014, 54(8): 1092-1096.
WANG Qingguo. Application of dual-satellite geolocation system using TDOA and FDOA in electromagnetic environment of signal mixed in frequency domain[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(8): 1092-1096. (in Chinese)

[2] 王勤果,龙宁. 双星时差频差无源定位系统定位算法工程指标分析[J]. 电讯技术, 2011, 51(7): 34-37.
WANG Qingguo, LONG Ning. Engineering index analysis of localization algorithm for dual-satellite passive geolocation using TDOA and FDOA[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(7): 34-37. (in Chinese)

[3] HAWORTH D P, MITH N G S, BARDELLI R, et al. Interference localization for EUTELSAT satellites—the first european transmitter location system[J]. International Journal of Satellite Communications, 1997, 15(4): 155-183.

[4] HO K C, XU W W. An accurate algebraic solution for moving source location using TDOA and FDOA measurements[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(9): 2453-2463.

[5] 徐义,郭福成,冯道旺. 一种单星仅测 TOA 无源定位方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 502-508.
XU Yi, GUO Fucheng, FENG Daowang. A new satellite passive localization method using TOA measurement only[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 502-508. (in Chinese)

[6] 金郁萍. 常用大地坐标系相互转换的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
JIN Yuping. Design and implementation of earth coordinate transformation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)

[7] DISTON D J. 飞机及其环境的建模与仿真: 第 1 卷: 平台运动学和综合环境[M]. 薛红军, 张晓燕, 译. 北京: 航空工业出版社, 2015.
DISTON D J. Computational modelling and simulation of aircraft and the environment; volume 1: platform kinematics and synthetic environment[M]. Translated by XUE Hongjun, ZHANG Xiaoyan. Beijing: Aviation Industry Publishing House, 2015. (in Chinese)

作者简介:



张宇阳(1985—),男,四川成都人,2010年于电子科技大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为数字信号处理、无线通信、辐射源定位。

ZHANG Yuyang was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1985. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2010. He is now an engineer. His research concerns digital signal processing, wireless communications and source localization.

Email: ezhangyy@163.com