

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.010

引用格式: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 Qin-guo. 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.]

# 双星时差频差定位体制在频域混叠电磁环境下的应用<sup>\*</sup>

王勤果<sup>\*\*</sup>

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

**摘 要:**现代战场电磁环境复杂,不同类型电磁信号在时频域碰撞混叠,现有常规侦察手段对此类信号的定位应用受到严重制约。双星时差频差定位体制通过互模糊函数求解信号到达时差和频差,分离频域混叠信号并获得高达公里量级的定位精度,非常适合于复杂电磁环境下的应用。通过求解模糊函数的方法分析了时差频差体制对频域混叠信号的分离和定位能力,然后结合美航母编队及其电磁环境构成,探讨了这一能力在监视航母编队,尤其是跟踪识别编队个体成员的具体应用。仿真与分析结果证明了双星时差频差定位体制的优势,对于天基侦察系统的建设具有重要意义。

**关键词:**天基侦察系统;双星定位;航母编队;时差/频差;互模糊函数

**中图分类号:**TN97      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-893X(2014)08-1092-05

## Application of Dual-Satellite Geolocation System Using TDOA and FDOA in Electromagnetic Environment of Signal Mixed in Frequency Domain

WANG Qin-guo

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

**Abstract:** In modern warfare, battlefield has complicated electromagnetic environment, where various electromagnetic signals collide with each other in all probability. It's very difficult for ordinary intelligence, surveillance and reconnaissance (ISR) systems to positioning these interlaced signals in frequency domain. The dual-satellite geolocation system using time difference of arrival (TDOA) and frequency difference of arrival (FDOA), which calculates the TDOA and the FDOA by crossing ambiguity function, can separate all interlaced signals in frequency domain and locate them with high accuracy up to kilometer level. It shall be suitable for applications in complicated electromagnetic environment. This paper analyzes the separation and positioning capability of TDOA/FDOA scheme for interlaced signals in frequency domain by the method of solving ambiguity function, and then, according to the composition of U. S. carrier battle group and its electromagnetic environment, discusses the application of this capability in observing carrier battle group, especially tracking and identifying individual member of carrier battle group. Simulations and analysis prove the advantage of this system and it is of great significance for constructing China's space-borne ISR system.

**Key words:** space-borne ISR system; dual-satellite geolocation; carrier battle group; TDOA/FDOA; cross ambiguity function

1 引 言

双星时差频差定位系统利用两颗卫星测量同一

辐射源的时差和频差信息实现信号定位,具有定位精度高、覆盖区域宽等优点。国外,Stein S 在 1981

年给出了时差和频差的测量方法和估计精度下限<sup>[1]</sup>;在国内,文献[2-3]分别介绍了其定位原理和定位精度分布,文献[4]分析了体制应用的工程设计考量,而文献[5]则首次介绍了该体制的同频多信号定位能力。

随着各种信号波形的广泛使用,现代战场环境中各种电磁辐射信号高度密集,不可避免地在时域、频域密集碰撞和混叠。分析技术现状,对频域混叠信号侦察定位仍是电子侦察领域中的难点。当出现多个混叠信号时,传统干涉仪体制基本丧失多信号分辨能力,而时差体制会出现较大测量误差,对两种定位体制的实际应用带来不同程度的制约和限制。而时差频差定位体制以其独有的频域混叠信号定位能力逐渐受到业界的广泛关注,具有广阔的应用前景。

本文介绍了双星时差频差定位体制的工作原理,重点分析了对频域混叠信号的定位和分辨能力,并以此为基础对其在现代战争环境下的应用作了进一步有益的探索。

2 时差频差体制定位原理

图 1 给出了双星时差频差体制对地面辐射源的定位工作原理。

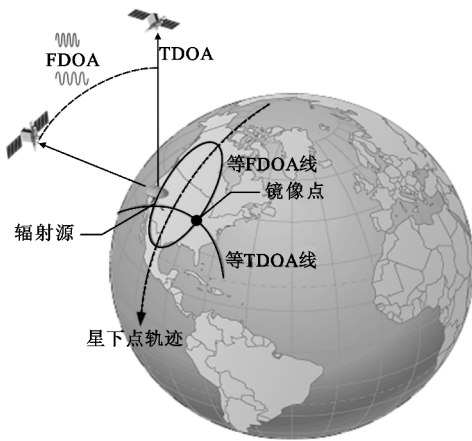


图 1 双星时差频差定位原理

Fig. 1 Operating principle of dual-satellite geolocation system

如图 1,地面辐射信号到达两星的等时差面与地球面相交形成开放曲线;该信号到达两星的多普勒频差面与地球表面相交形成封闭曲线。两条曲线相交于两点,其中之一即为辐射信号真实坐标点。设目标辐射源位于  $E$  处,其坐标矢量记为  $E = [x, y, z]^T$ ;两卫星位置坐标分别为  $S_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$  和  $S_2 = [x_2, y_2, z_2]^T$ ,速度分别为  $v_1 = [v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}]^T$  和  $v_2 = [v_{x2}, v_{y2}, v_{z2}]^T$ ,则得到关于信号到达时差

(TDOA)和频差(FDOA)联立方程如下:

$$\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}-\tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2}=c\times TDOA \\ &\left[\frac{v_{x1}(x-x_1)+v_{y1}(y-y_1)+v_{z1}(z-z_1)}{\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}}-\right. \\ &\left.\frac{v_{x2}(x-x_2)+v_{y2}(y-y_2)+v_{z2}(z-z_2)}{\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2}}\right]\frac{f}{c}=FDOA \\ &x^2+y^2+z^2=R^2 \end{aligned}\tag{2}\tag{3}$$

其中,  $f$  为辐射信号频率,  $c$  为光速,  $R$  为地球半径。通过互模糊函数计算出两星间的 TDOA、FDOA,通过解析算法<sup>[6]</sup>可求解辐射源位置。

3 频域混叠信号定位能力

在时差频差定位体制中,设两个相互独立的辐射信号分别为  $s_1(t)$  和  $s_2(t)$ ,则主星和辅星接收到的信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  分别可表示为

$$x_1(t)=A_{d1}s_1(t)+A_{d2}s_2(t)+n_1(t)\tag{4}$$

$$x_2(t)=A_{r1}s_1(t-\tau_1)e^{j2\pi f_{d1}t}+A_{r2}s_2(t-\tau_2)e^{j2\pi f_{d2}t}+n_2(t)\tag{5}$$

其中,  $A_{d1}$ 、 $A_{d2}$ 、 $A_{r1}$ 、 $A_{r2}$  为主星和辅星接收的信号幅度;  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  分别是  $s_2(t)$  相对于  $s_1(t)$  的时延;  $f_{d1}$ 、 $f_{d2}$  分别是  $s_2(t)$  相对于  $s_1(t)$  的多普勒频移;  $n_1(t)$  和  $n_2(t)$  分别是主星和辅星叠加的噪声。

则主辅星接收信号的互模糊函数可表示为

$$\begin{aligned} A_{x_1x_2}(\tau,f_d) &= \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t)x_2^*(t-\tau)e^{j2\pi f_d t} dt = \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} [A_{d1}s_1(t)+A_{d2}s_2(t)+n_1(t)] \times \\ &[A_{r1}s_1(t-\tau_1-\tau)e^{j2\pi f_{d1}(t-\tau)} + \\ &A_{r2}s_2(t-\tau_2-\tau)e^{j2\pi f_{d2}(t-\tau)} + n_2(t-\tau)]^* e^{j2\pi f_d t} dt = \\ &A_{d1}A_{r1} \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t) [s_1(t-\tau_1-\tau)e^{j2\pi f_{d1}(t-\tau)}]^* e^{j2\pi f_d t} dt + \\ &A_{d2}A_{r2} \int_{-\infty}^{+\infty} s_2(t) [s_2(t-\tau_2-\tau)e^{j2\pi f_{d2}(t-\tau)}]^* e^{j2\pi f_d t} dt + \\ &A_{d1}A_{r2} \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t) [s_2(t-\tau_2-\tau)e^{j2\pi f_{d2}(t-\tau)}]^* e^{j2\pi f_d t} dt + \\ &A_{d2}A_{r1} \int_{-\infty}^{+\infty} s_2(t) [s_1(t-\tau_1-\tau)e^{j2\pi f_{d1}(t-\tau)}]^* e^{j2\pi f_d t} dt + \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} n_1(t) [A_{r1}s_1(t-\tau_1-\tau)e^{j2\pi f_{d1}(t-\tau)} + \\ &A_{r2}s_2(t-\tau_2-\tau)e^{j2\pi f_{d2}(t-\tau)}]^* e^{j2\pi f_d t} dt + \end{aligned}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} [A_{d1}s_1(t) + A_{d2}s_2(t)] n_2^*(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} dt + \int_{-\infty}^{+\infty} n_1(t) n_2^*(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \tag{6}$$

分别令

$$A_{s_1}(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t) [s_1(t - \tau_1 - \tau) e^{j2\pi f_{d1}(t-\tau)}]^* e^{j2\pi f_d t} dt$$
$$A_{s_2}(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_2(t) [s_2(t - \tau_2 - \tau) e^{j2\pi f_{d2}(t-\tau)}]^* e^{j2\pi f_d t} dt$$
$$A_{s_1s_2}(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(t) [s_2(t - \tau_2 - \tau) e^{j2\pi f_{d2}(t-\tau)}]^* e^{j2\pi f_d t} dt$$

则有

$$A_{s_1s_2}(\tau, f_d) = A_{d1}A_{r1}A_{s_1}(\tau, f_d) + A_{d2}A_{r2}A_{s_2}(\tau, f_d) + A_{d1}A_{r2}A_{s_1s_2}(\tau, f_d) + A_{d2}A_{r1}A_{s_2s_1}(\tau, f_d) + \int_{-\infty}^{+\infty} n_1(t) [A_{r1}s_1(t - \tau_1 - \tau) e^{j2\pi f_{d1}(t-\tau)} + A_{r2}s_2(t - \tau_2 - \tau) e^{j2\pi f_{d2}(t-\tau)}]^* e^{j2\pi f_d t} dt + \int_{-\infty}^{+\infty} [A_{d1}s_1(t) + A_{d2}s_2(t)] n_2^*(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} dt + \int_{-\infty}^{+\infty} n_1(t) n_2^*(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \tag{7}$$

根据模糊函数定义可知,  $A_{s_1}(\tau, f_d)$ 、 $A_{s_2}(\tau, f_d)$  分别是  $s_1(t)$  和  $s_2(t)$  的自模糊函数,  $A_{s_1s_2}(\tau, f_d)$ 、 $A_{s_2s_1}(\tau, f_d)$  是  $s_1(t)$  和  $s_2(t)$  的互模糊函数。

从数学表达式可以看到, 多个信号的互模糊函数由信号的自模糊函数、信号之间的互模糊函数以及噪声函数等副峰构成。根据两个信号在时差-频差坐标系的分布可知, 即使在频域完全混叠的多个信号, 只要能在时差-频差坐标系中找到其模糊函数对应的时差和频差值, 即能通过前述定位方程求解目标信号坐标, 其求解方法在笔者的相关文章中已有论证和阐述<sup>[5]</sup>, 这也成为时差频差定位体制应用于复杂电磁环境分离定位频域混叠信号的理论基础。而在模糊函数图中时差、频差分辨力决定了该体制对频域混叠信号的空间分辨能力, 成为我们关注的对象。

省略推导过程, 根据斯默斯坦的论述<sup>[7]</sup>, 在模糊函数图中, 对于若干信号的时差分辨力  $\Delta TDO$ 、频差分辨力  $\Delta FDO$  与信号带宽  $B$  和积累时间  $T$  密切相关, 满足如下关系:

$$\Delta TDO \approx \frac{1}{2} \left( \frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right) \tag{8}$$

$$\Delta FDO \approx \frac{1}{2} \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \tag{9}$$

而频域混叠信号  $s_1(t)$  与  $s_2(t)$  可被分离并定位的准则为: 若两信号的模糊函数在时差轴 (或频差轴) 上的几何距离大于时差 (或频差) 分辨力时, 即可被双星时差频差定位系统准确分离并定位, 如图 2 所示。

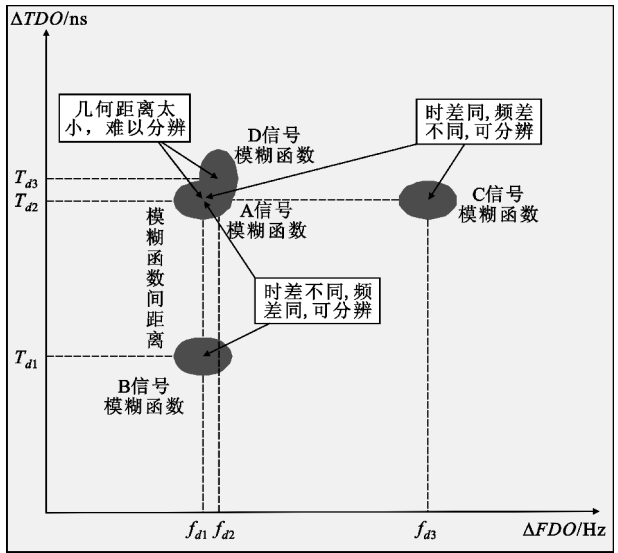


图 2 互模糊函数在时差-频差坐标系中的可分辨示意图  
Fig. 2 Discriminability of cross ambiguity function in the TDOA-FDOA reference frame

根据试验数据统计, 目前工程能达到的测量精度已经非常接近理论分辨力。

取 500 km 的卫星轨道高度, 星间距为 60 km, 图 3 给出了某一低轨系统对地球表面 S 频段混叠信号定位结果的可分辨区域分布情况, 其中信号带宽为 100 kHz, 积累时间 100 ms。

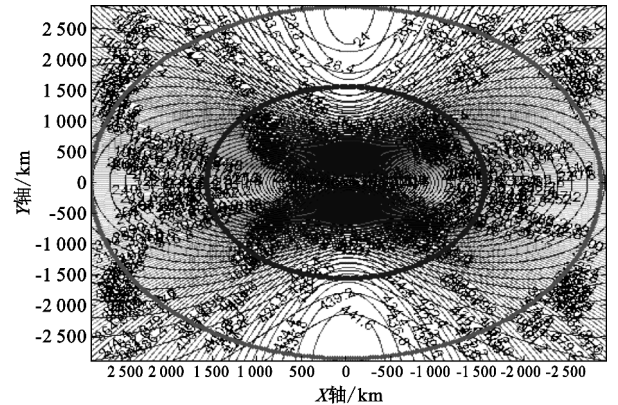


图 3 某 S 频段混叠信号的可分辨区域分布图  
Fig. 3 Discriminable zones of an S-band interlaced signal

由图 3 可知, 当信号带宽为 100 kHz 的两个频域混叠信号在 100 ms 积累时间下, 只要该两个信号处

于图 3 中不同方格代表的地球表面时,则该两个信号均可准确定位;若处于同一方格中,则系统不能分辨定位结果属于哪一辐射源。由于卫星具有相对高的运动速度,该体制对地、海面静止和运动目标具有高达公里级的定位精度<sup>[4]</sup>。这些特性对于时差频差体制应用于复杂电磁环境的情报搜集具有重要的指导意义。

4 应用探讨

航母编队是以航空母舰为核心、由不同舰种按照一定队形构建而的特混舰队。根据任务的不同,航母编队往往采用不同的战斗队形。对航母编队的跟踪,我们既希望监视编队整体的动向,也希望能进一步掌握编队内成员的动作和部署情况。

单航母编队往往配置 4 艘防空巡洋/驱逐舰、4 艘反潜型驱护舰和 1~2 艘攻击型核潜艇,为保障中途补给,还配有一艘高速补给舰或加油舰。图 4 给出了美航母编队一种近似的等效队形,可以看到,航母编队由不同任务类型的水面舰艇和飞机组成,尤

其内层防御圈水面舰艇编队比较密集。同时,由于作战的需要,编队成员配置了多种通信、雷达、导航和指挥控制等电子信息系统,而相同系列的电子设备又多配置在不同的平台上<sup>[8]</sup>。表 1 给出了美航母编队部分辐射信号概略分布情况,其中√表示配置有所示信息装备,●表示未配置该信息装备。

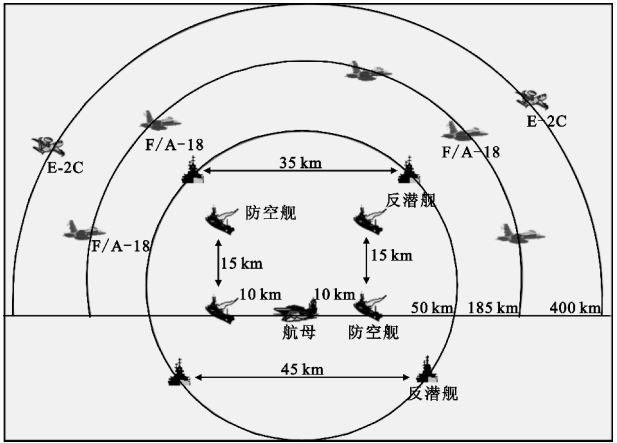


图 4 美航母编队的一种近似队形  
Fig. 4 Approximate array of U. S. carrier battle group

表 1 美航母编队水面舰艇部分辐射源分布一览  
Table 1 Emitter distribution of U. S. carrier battle group

| 辐射源           | 信号类型 | 工作频段/GHz                    | 尼米兹级 | 提康德罗加级 | 阿利伯克级 | 斯普鲁恩斯级 |
|---------------|------|-----------------------------|------|--------|-------|--------|
| AN/SPS-48E    | 雷达   | 2.9~3.1                     | √    | ●      | ●     | ●      |
| AN/SPS-49     | 雷达   | 0.850~0.942                 | √    | √      | ●     | √      |
| AN/SPS-67     | 雷达   | 5.4~5.8                     | √    | √      | √     | ●      |
| AN/SPS-64     | 雷达   | 3.050/9.375                 | √    | √      | √     | √      |
| AN/SPY-1      | 雷达   | 1.55~5.20                   | ●    | √      | √     | ●      |
| AN/SPQ-9A     | 雷达   | 8~12                        | ●    | √      | √     | √      |
| AN/SPG-62     | 雷达   | 8~12                        | ●    | √      | √     | ●      |
| MK23TAS       | 雷达   | 1~2                         | √    | ●      | ●     | √      |
| AN/URN-25     | 导航   | 0.962~1.213                 | √    | √      | √     | ●      |
| Link-4A/11/16 | 数据链  | 0.225~0.400/<br>0.960~1.215 | √    | √      | √     | √      |
| AN/WSC-3      | 通信   | 0.225~0.400                 | √    | √      | √     | √      |
| AN/WSC-6      | 通信   | 7.9~8.4                     | √    | ●      | ●     | ●      |
| AN/USC-38     | 通信   | 45.5                        | √    | √      | √     | √      |
| AN/SLQ-32     | 电子战  | 1~18                        | √    | √      | √     | √      |

可以看到,航母编队在一个有限空间范围内集中了多种作战平台,各平台之间携带大量同类型电子设备。资料显示,目前水面舰艇编队已经采用雷达组网探测<sup>[9]</sup>,特别是当处于最低等级电磁辐射管制时,航母编队在一个有限的空间范围内经常呈现一种对外辐射多个频域密集甚至混叠的复杂电磁状态。对这些混叠信号进行侦察定位并进一步关联到

平台个体,不但能对编队整体进行跟踪和监视,同时能实现对编队成员身份、作战部署及作战意图等的分析和掌控。目前常规手段对于这种时空密集、频域混叠的电磁信号的定位跟踪存在较大的技术困难,而双星时差频差定位体制以其在复杂电磁环境下突出的混叠信号定位能力,无疑具备了天然的应用优势。

根据图 3 对某 S 频段混叠信号可分辨区域分布仿真结果,其在空间上分辨并定位航母编队内成员的局部放大结果如图 5 所示。

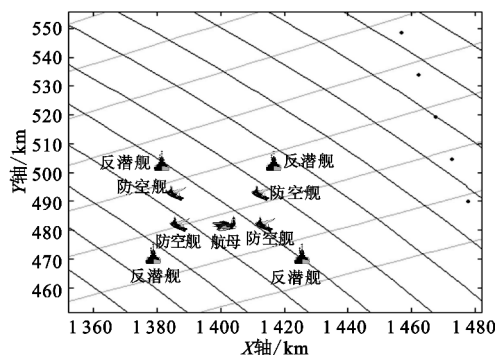


图 5 双星时差频差体制对航母编队内成员的空间分辨和定位能力

Fig.5 Space resolution and geolocation capability for U. S. carrier battle group members by dual-satellite TDOA/FDOA geolocation system

如图 5 所示,即使不同舰艇平台辐射频域混叠的电磁信号,只要处于不同方格所表示的可分辨区域中,均能被双星时差频差系统从空间上分离并定位。与此同时,通过增加积累时间将进一步提高其空间分辨能力,足以精确掌握编队成员实时动态。充分利用这一特性,该系统对于同频恶意干扰源的侦察定位具有不可低估的应用潜力<sup>[10]</sup>,这里不做具体介绍。

## 5 结束语

本文从双星时差频差定位体制的工作原理入手,针对现代战场复杂密集电磁环境,通过求解模糊函数的方法从理论上分析了该体制对频域混叠信号的分离和定位能力,最后结合美航母编队及其电磁环境构成,探讨并论述了这一能力在监视航母编队、跟踪识别其编队个体成员的具体应用。应该看到,双星时差频差定位体制同时充分利用了时间和频率这两个重要的定位要素,在现代战场密集电磁环境下具有天然优势,对于其系统建设和具体应用,需要开展进一步的广泛探讨和深入挖掘。通过相关研究努力发挥其体制优势,也是我们后续的主要研究内容和方向。

## 参考文献:

[1] Stein S. Algorithms for ambiguity function processing [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1980, 29(3): 588-599.  
[2] 周彬,李建军. 双星 TDOA/FDOA 定位技术研究[J].

电子对抗,2004(4):14-18.

ZHOU Bin,LI Jian-jun. Research on Locating Technique of TDOA&FDOA with Twin Satellites [J]. Electronic Warfare,2004(4):14-18. (in Chinese)

[3] 郭福成,樊昀. 双星 TDOA/ FDOA 无源定位方法分析 [J]. 航天电子对抗,2006(6):20-24.

GUO Fu-cheng,FAN Yun. Analysis of dear satellites geolocation method using TDOA and FDOA[J]. Aerospace Electronic Warfare,2006(6):20-24. (in Chinese)

[4] 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 Qin-guo, LONG Ning. Engineering Index Analysis of localization Algorithm for Dual-Satellites Passive Geolocation Using TDOA and FDOA[J]. Telecommunication Engineering,2011,51(7):34-37. (in Chinese)

[5] 龙宁,曹广平,王勤果. 双星时差频差定位系统中的多信号定位技术[J]. 电讯技术,2011,51(2):16-20.

LONG Ning, CAO Guang-ping, WANG Qin-guo. Multi-signals localization Technique for Dual-Satellites Geolocation System Using TDOA and FDOA[J]. Telecommunication Engineering,2011,51(2):16-20. (in Chinese)

[6] Ho K C, Chan Y T. Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,1997, 33(3):770-783.

[7] 郭福成,樊昀,周一宇. 空间电子侦察定位原理[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

GUO Fu-cheng, FAN Yun, ZHOU Yi-yu. Localization principles in space electronic reconnaissance[M]. Beijing:Nation Defense Indutry Press,2012. (in Chinese)

[8] 李耐和,黄锋,李翼,等. 美国未来海军打击群 C4ISR 系统[M]. 北京:国防工业出版社,2009.

LI Nai-he, HUANG Feng, LI Yi, et al. Committee on C4ISR for Future Naval Strike Groups[M]. Beijing:Nation Defense Indutry Press,2009. (in Chinese)

[9] 周希辰,华学增. 水面舰艇编队雷达探测网络研究 [J]. 雷达与对抗,2000(4):1-8.

ZHOU Xi-chen, HUA Xue-zeng. Research on the Radar Detection Network of the Warship Fleet [J]. Radar & Ecm,2000(4):1-8. (in Chinese)

[10] Haworth D P, Smith N G, Bardelli R, et al. Interference localization for EUTELSAT satellites-the first European transmitter location system[J]. International Journal of Satellite Communications, 1997,15(3):155-183.

## 作者简介:



王勤果(1976—),男,四川内江人,高级工程师,主要研究方向为综合电子信息系统。

WANG Qin-guo was born in Neijiang, Sichuan Province, in 1976. He is now a senior engineer. His research concerns integrated electronic information system.

Email:gaochui@yeah. net