

机载双基地 MIMO 雷达对隐身目标的探测范围

张筱, 吴军, 彭芳, 邓有为
(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 针对隐身目标探测问题, 引入双基地 MIMO 雷达, 利用其雷达方程得出的探测不等式, 对雷达探测隐身目标范围进行了研究。以 F-117A 为典型隐身目标, 利用网格剖分法对预警区域进行划分, 通过计算出目标在不同位置的双基地雷达散射截面积, 得出双基地 MIMO 雷达对目标的探测区域。经实验获得了双基地 MIMO 雷达的探测范围与基线长度、发射天线阵列数及相参积累个数之间的关系。实验结果表明, 在对隐身目标的探测范围上, 与常规双基地雷达相比, 双基地 MIMO 雷达有着明显的优势。

关键词: MIMO 雷达; 双基地雷达; 隐身目标; 雷达散射截面积; 探测范围

中图分类号: V271.4; TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)11-0109-05

Detection Coverage Range of Airborne Bistatic MIMO Radar to Stealthy Targets

ZHANG Xiao, WU Jun, PENG Fang, DENG Youwei

(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To solve the problem of the stealthy object detection, the judging inequality of radar detection based on the bistatic MIMO radar equation was utilized to make a research on the radar's detection coverage to stealthy object. Taking the F-117A fighter as a typical stealthy object, the detection area was divided by the grid splitting algorithm. By calculating the bistatic radar cross section of the stealthy object at each point, the object detection coverage for bistatic MIMO radar could be obtained. The relationship among the detection coverage, the baseline length, the number of the transmitting antenna and phase coherent accumulation was determined by experiment. The experimental result shows that the bistatic MIMO radar is superior to the conventional bistatic radar on detection range to stealthy target.

Key words: MIMO radar; bistatic radar; stealthy target; radar cross section; detection coverage

0 引言

双基地雷达体制在“四抗”性能上有着单基地雷达无法比拟的优势。但 F-117A、F-22 等型隐身飞机的发展, 对雷达的反隐身性能提出了更高的要求。目前, 国内外许多学者将 MIMO (Multiple input multiple output) 技术应用于雷达系统, 取得了诸多成果。文献[1]通过仿真对收发全分集的 MIMO 雷达在目标检测、目标参数估计、目标识别和分辨力等方面的良好性能进行了验证; 文献[2]对 MIMO 雷达系统结构、信号设计、目标检测、参数估计以及高分辨性能 5 方面进行了

研究, 并指出 MIMO 雷达在实际应用中所面临的制约因素; 文献[3]运用 Neyman-Pearson 准则, 在目标的分布源模型框架下, 研究 MIMO 雷达分集路径不完全独立条件下的检测方法和性能, 证明了当存在 2 个以上相互独立观测分量时, MIMO 雷达能够更好地解决目标 RCS 闪烁问题; 文献[4]对 MIMO 雷达如何克服目标 RCS 衰减及对 RCS 起伏特性的应用做了研究。国内外很多大学对统计 MIMO 雷达展开研究, 内容涉及阵列优化、参数估计等多个方面^[5-7], 同时, 对于隐身目标探测, 文献[8]提出了对探测区域进行网格剖分来计算隐身目标可探测范围的方法。

本文采用 MIMO 双基地雷达体制, 针对隐身目标的探测范围进行系统的分析, 为雷达反隐身的研究提供了一种新的研究思路。

收稿日期: 2013-05-06

修回日期: 2013-06-04

作者简介: 张筱 (1989—), 女, 陕西西安人, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。

1 常规双基地及双基地 MIMO 雷达探测范围分析

1.1 常规双基地雷达的探测范围分析

在不考虑大气损耗等因素的条件下,基于能量的双基地雷达方程为^[9]

$$(R_t R_r)^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_B(\beta)}{(4\pi)^3 k T_s B_n (S/N)_{\min}} \quad (1)$$

式中: R_t 表示目标到发射站的距离; R_r 表示目标到接收站的距离; P_t 为发射功率; G_t 、 G_r 分别为发射、接收天线增益; $\sigma_B(\beta)$ 为目标的双基地雷达散射截面面积; k 为玻尔兹曼常数; T_s 为有效温度; B_n 为噪声带宽; $(S/N)_{\min}$ 为最小信噪比。

本文中为与双基地 MIMO 进行比较,在常规雷达方程中考虑脉冲积累个数 m 的影响,则将双基地雷达方程改写为

$$(R_t R_r)^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma_B(\beta) m}{(4\pi)^3 k T_s B_n (S/N)_{\min}} \quad (2)$$

可得,双基地雷达探测目标不等式为^[8]

$$(S/N)_{\min} \leq \frac{\sigma_B(\beta) \cdot C_1}{(R_t R_r)^2} \quad (3)$$

其中

$$C_1 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 m}{(4\pi)^3 k T_s B_n} \quad (4)$$

式中, C_1 是由双基地雷达性能决定的参数。若满足式(3),则认为此处目标可被探测。由式(4)可得,在雷达参数确定的情况下, C_1 为恒定值,此时,只有 R_t 、 R_r 和 $\sigma_B(\beta)$ 对雷达探测距离产生影响。

1.2 双基地 MIMO 雷达探测范围分析

双基地 MIMO 雷达基本结构如图 1 所示。

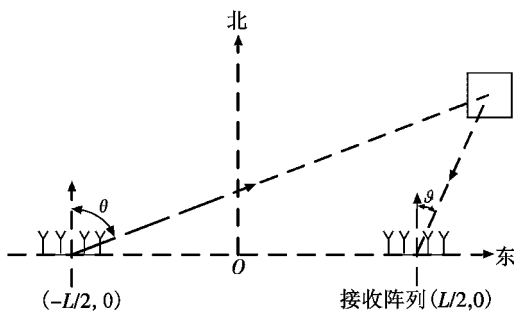


图 1 双基地 MIMO 雷达几何配置示意图

Fig. 1 The geometric arrangement schematic plot of bistatic MIMO radar

将发射阵元分成 M 路发射相互正交信号的子阵,这些信号照射到目标,经目标散射后由接收端的 N 个接收阵元接收。由于发射信号的正交性,在空间中将会形成低增益的宽波束,在接收端对接收的信号进行匹配滤波和相参积累,增大信噪比,可以得到不同发射

信号对目标探测所做出的贡献。对于双基地 MIMO 雷达,它的占空比远远高于常规双基地雷达,可达到 80% ~ 90%,甚至更高^[10]。

在不考虑大气损耗和传播因子的情况下,目标附近雷达信号功率密度为

$$S_t = \frac{M p_t G_t}{4\pi R_t^2} \quad (5)$$

式中: p_t 、 g_t 分别为发射阵列和接收阵列的增益; M 表示发射子阵数。于是接收阵列附近的目标散射信号功率密度为

$$S_r = S_t \cdot \frac{\sigma_B(\beta)}{4\pi R_r^2} = \frac{M p_t g_t \sigma_B(\beta)}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \quad (6)$$

雷达的有效接收面积 A_r 同接收增益 g_r 有如下关系

$$A_r = \frac{g_r \lambda^2}{4\pi} \quad (7)$$

则双基地 MIMO 雷达方程为

$$P_r = A_r \cdot S_r = \frac{M p_t g_t g_r \sigma_B(\beta) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (8)$$

为体现 MIMO 雷达的优越性,建立以能量为基础的雷达方程。在数字信号处理输入端得到的目标回波信号总能量为

$$E = P_r \eta_B T_B = \eta_B T_B \frac{M p_t g_t g_r \sigma_B(\beta) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (9)$$

式中: η_B 为该发射系统的占空比; T_B 为完成一次目标检测过程发射的总时间。噪声功率谱密度为

$$N = k T_s \quad (10)$$

匹配滤波器输出端信噪比为

$$S/N = \frac{2E}{N} \quad (11)$$

则由式(8)~式(11)可得

$$S/N = \frac{2E}{N} = 2\eta_B T_B \frac{M p_t g_t g_r \sigma_B(\beta) \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2 k T_s} \quad (12)$$

考虑接收端对信号进行 n 次相参积累,使得信噪比提高为原来的 n 倍,即雷达所需要的最小信噪比变为原来的 $1/n$,则在不考虑传播因子和大气损耗的情况下雷达方程可表示为

$$(R_t R_r)^2 = 2\eta_B T_B \frac{M p_t g_t g_r \sigma_B(\beta) \lambda^2 n}{(4\pi)^3 k T_s (S/N)_{\min}} \quad (13)$$

其中,由式(11)可得双基地 MIMO 雷达探测目标不等式为

$$\frac{(S/N)_{\min}}{n} \leq \frac{C_2 \cdot \sigma_B(\beta)}{R_t^2 R_r^2} \quad (14)$$

其中

$$C_2 = 2\eta_B T_B \frac{M p_t g_t g_r \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_s} \quad (15)$$

式中, C_2 由双基地 MIMO 雷达性能参数决定。当满足

式(14)时,则认为此处目标可被探测到。

2 双基地雷达探测范围计算方法

采用网格法来计算双基地雷达的探测区域。如图 2 所示,以双基地雷达连线的中点为坐标原点,基线长度为 L 。以基线方向为 x 轴,垂直于基线的方向为 y 轴,形成雷达预警区域。按照探测不等式对探测区域内的位置进行遍历,在遍历过程中 x 轴、 y 轴方向步长分别取 Δx 、 Δy 。

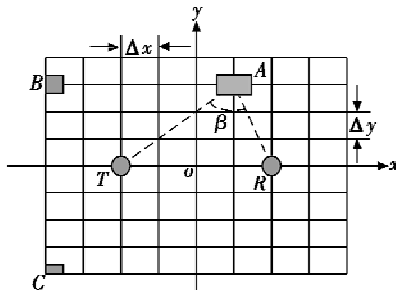


图 2 网格剖分法示意图

Fig. 2 The schematic plot of the grid anatomy method

在对探测面积的计算中,当目标处在如图中 A 点时,若该点满足探测不等式,则认为以该点为中心的面积为 $s_A = \Delta x \cdot \Delta y$ 的矩形区域均可被探测到;当目标处在如图中 B 点时,若该点满足探测不等式,则认为与该点相邻的面积为 $s_B = \Delta x \cdot \Delta y/2$ 的矩形区域可被探测到;当目标处在如图中 C 点时,若该点满足探测不等式,则认为与该点相邻的面积为 $s_C = \Delta x \cdot \Delta y/4$ 的矩形区域可被探测到。

在整个探测面积的计算过程中,在所需要研究的区域内按照所给定的步长逐个取点。将每一个点的参数代入所对应的探测不等式(式(3)或式(14))进行判定。若满足该不等式,则判定该点可被探测到,再按照网格剖分法得出该点附近可被探测面积,并对该面积区域进行描点。在对研究区域内的所有点的判定结束后,对可探测点所代表的可探测面积相叠加,最终得到雷达对目标的总探测面积,通过对所有可被探测点的面积区域进行描点,绘制出可探测范围图像。

3 常规双基地及双基地 MIMO 雷达对隐身目标探测范围计算

3.1 隐身目标的双基地雷达散射截面积计算

利用电磁仿真软件,以美国 F-117A 隐身战机为典型隐身目标,计算出在 S 波段时的目标双基地 RCS 值随双基地角和入射角的变化关系如图 3 所示。从仿真结果可以看出:当入射角为 0° 与 180° 时,RCS 值较小;当入射角为 90° 与 270° 时,RCS 值较大;当双基地角为 180° 时,RCS 达到最大值。

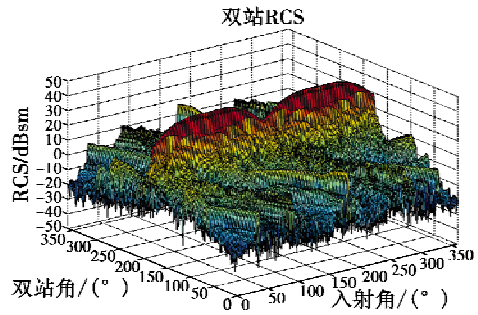


图 3 F-117A 飞机双基地 RCS 特性曲线

Fig. 3 The characteristic curve for the bistatic radar cross section of F-117A

3.2 常规双基地雷达对隐身目标探测范围的计算

设预警探测范围为: $-400 \text{ km} \leq x \leq 400 \text{ km}$, $0 \text{ km} \leq y \leq 180 \text{ km}$,其面积 s 为 144000 km^2 ,步长 Δx 、 Δy 均为 1 km ,假定目标与机载雷达均处于 8 km 高空,发射站坐标为 $(-L/2, 0)$,接收站坐标为 $(L/2, 0)$ 。

常规机载雷达的技术参数为:发射功率 P_t 为 10 kW ,天线增益 $G_t = G_r = 25 \text{ dB}$,设系统噪声带宽 B_n 为 1 MHz ,最小可检测信噪比 $(S/N)_{\text{min}}$ 为 15 dB ,脉冲积累个数 m 为 128 。

图 4、图 5 中黑色部分表示雷达可探测区域,红点表示双基地雷达位置。

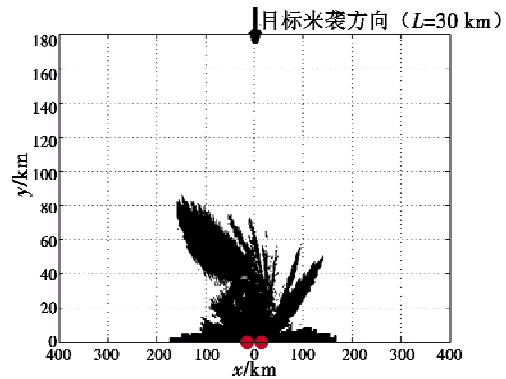


图 4 常规双基地雷达探测范围 ($L=30 \text{ km}$)

Fig. 4 The detection coverage of the normal bistatic radar when $L=30 \text{ km}$

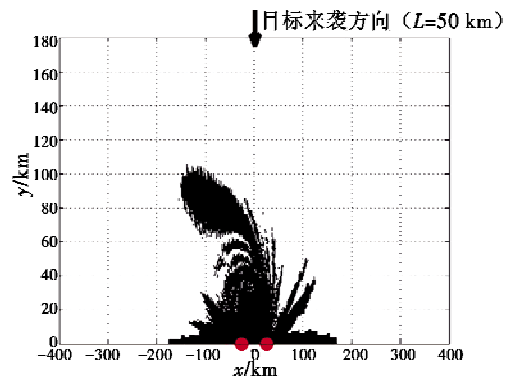


图 5 常规双基地雷达探测范围 ($L=50 \text{ km}$)

Fig. 5 The detection coverage of the normal bistatic radar when $L=50 \text{ km}$

经仿真计算得,常规双基地雷达中, $L=30\text{ km}$ 时,雷达可探测范围面积 $s_{11}=12539\text{ km}^2$; $L=50\text{ km}$ 时,雷达可探测范围面积 $s_{12}=13396\text{ km}^2$ 。

通过仿真结果可以看出,随着基线长度的增大,对目标的探测面积也增大,这主要是由于空中同一位置的目标对雷达的双基地角增大而引起的;发射站附近的探测范围随着基线长度的增加离散程度增大,其对目标的跟踪能力下降。

3.3 双基地 MIMO 雷达对隐身目标探测范围计算

此时, MIMO 雷达由发射子阵间距所引起的双基地角及入射角的变化可忽略不计。假设两载机同向同速运动,此时基线的长度可认为是固定的,本文在此理想条件下进行仿真,研究机载双基地 MIMO 雷达对隐身目标的探测范围。机载双基地 MIMO 雷达技术参数为:发射功率 $P_t=5\text{ kW}$,由于双基地 MIMO 雷达将在空域形成低增益的宽波束,故将天线增益设为 $G_t=G_r=20\text{ dB}$,最小可检测信噪比与常规双基地雷达相同,但由于进行相参处理,则经相参处理后的信噪比变为原来的 $1/n$,发射系统的占空比 $\eta_B=0.8$,为完成一次目标检测过程发射的总时间 $T_B=2\text{ ms}$ 。双基地 MIMO 雷达对 F-117A 的探测范围结果计算如下。

图6~图9中黑色部分表示雷达可探测区域,红点表示双基地雷达位置。经过仿真计算可得:当 $L=30\text{ km}$, $M=2$, $n=1$ 时,可探测范围面积 $s_{21}=18977\text{ km}^2$;当 $L=50\text{ km}$, $M=2$, $n=1$ 时,雷达可探测范围面积 $s_{22}=20838\text{ km}^2$;当 $L=30\text{ km}$, $M=4$, $n=1$ 时,雷达可探测范围面积 $s_{23}=26553\text{ km}^2$;当 $L=30\text{ km}$, $M=2$, $n=8$ 时,雷达可探测范围面积 $s_{24}=53599\text{ km}^2$ 。

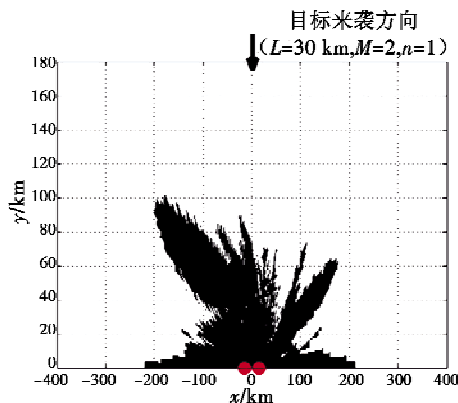


图6 双基地 MIMO 雷达探测范围($L=30\text{ km}$, $M=2$, $n=1$)

Fig. 6 The detection coverage of the bistatic MIMO radar ($L=30\text{ km}$, $M=2$, $n=1$)

仿真计算结果如表1所示。对比图6、图7可以看出,探测面积随着基线长度的增加而增大,但同时伴随着离散程度的增加。将图6与图8、图9对比可以看出,增加天线阵列数与接收端的相参积累个数都可以有效

地增加对隐身目标的探测面积,在空域上形成较为宽广的探测范围。将常规双基地雷达探测面积与双基地 MIMO 雷达探测面积相比较可以看出,前者在进行长时间的脉冲积累后的探测面积才能达到与后者在相同的数量级,同时,双基地 MIMO 雷达还可以通过增加发射端的子阵数,或在接收端进行相参积累来进一步扩大对隐身目标的探测范围。

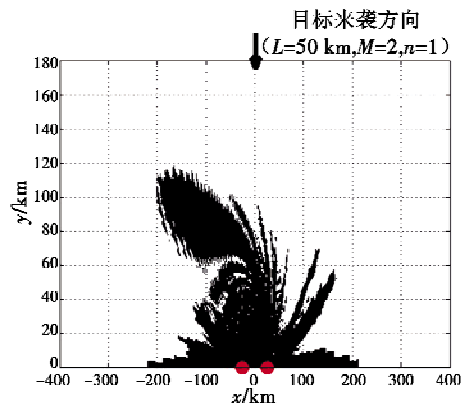


图7 双基地 MIMO 雷达探测范围($L=50\text{ km}$, $M=2$, $n=1$)

Fig. 7 The detection coverage of the bistatic MIMO radar ($L=50\text{ km}$, $M=2$, $n=1$)

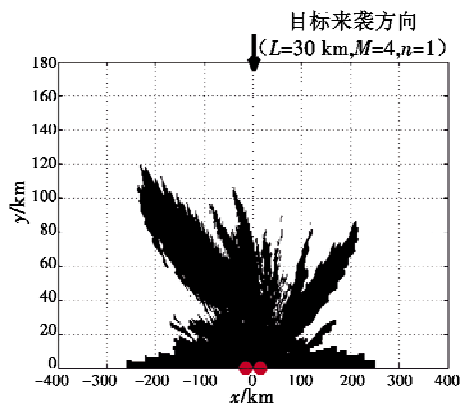


图8 双基地 MIMO 雷达探测范围($L=30\text{ km}$, $M=4$, $n=1$)

Fig. 8 The detection coverage of the bistatic MIMO radar ($L=30\text{ km}$, $M=4$, $n=1$)

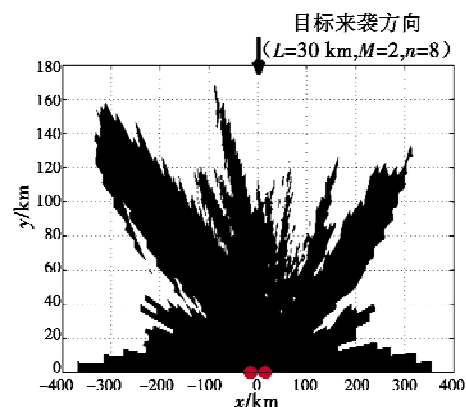


图9 双基地 MIMO 雷达探测范围($L=30\text{ km}$, $M=2$, $n=8$)

Fig. 9 The detection coverage of the bistatic MIMO radar ($L=30\text{ km}$, $M=2$, $n=8$)

表 1 双基地, MIMO 雷达对 F-117A 探测面积计算结果

Table 1 The result of detection coverage range of airborne bistatic MIMO radar for F-117A

	基线长度 <i>L</i> /km	发射子阵 个数 <i>M</i>	相参处理 个数 <i>n</i>	探测面积/ <i>s</i> · km ²
图 6	30	2	1	18977
图 7	50	2	1	20838
图 8	30	4	1	26533
图 9	30	2	8	53599

4 结论

由 RCS 计算结果可以看出, 利用双基地雷达可以较好地利用隐身目标的非后向散射能量来提高探测能力。将 MIMO 技术引入双基地雷达, 建立基于能量的双基地 MIMO 雷达方程, 得到探测不等式, 计算出隐身目标探测范围, 更加直观地绘制出了双基地 MIMO 雷达对隐身目标的探测范围。根据实验结果可以看出, 双基地 MIMO 雷达利用其高占空比、多发阵列、接收端的相参积累的特点, 在对隐身目标的探测范围上显示出了明显的优势。该体制雷达为探测隐身目标提供了新方法。

参考文献

[1] 何子述, 韩春林, 刘波. MIMO 雷达概念及其技术特点分析[J]. 电子学报, 2005, 33(12A): 2441-2445.

[2] 陈浩文, 黎湘, 庄钊文. 一种新兴的雷达体制——MIMO 雷达[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1190-1198.

[3] 戴喜增, 彭应宁, 汤俊. MIMO 雷达检测性能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007(1): 88-91.

[4] LEHMANN N H, FISHLER E, HAIMOVICH A M, et al. Evaluation of transmit diversity in MIMO radar direction finding [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5): 2215-2225.

[5] LEHMANN N, HAIMOVICH A M, BLUM R S, et al. High resolution capabilities of MIMO radar[C]//Proceedings of the 40th Asilomar Conference. Signal, System and Computers, 2006, 25-30.

[6] MAIO A D, LOPS M. Design principles of MIMO radar detectors [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 886-898.

[7] QIAN He, LEHMANN N, BLUM R S, et al. MIMO radar moving target detection in homogeneous clutter, to appear [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(3): 1290-1301.

[8] 张小宽, 刘尚钊, 张晨新, 等. 隐身目标的双基地雷达探测技术[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(3): 444-446.

[9] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

[10] 刘红明. 双基地 MIMO 雷达原理与理论研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.

(上接第 108 页)

参考文献

[1] BAR-SHALOM Y. Multitarget-multisensor tracking: Applications and advances [M]. 3rd ed. Boston: Artech House, 2000.

[2] HUE C, LE CADRE J P. Tracking multiple objects with particle filtering [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 791-812.

[3] WILLIAM F L, AARON D L. Unscented Kalman filters for multiple target tracking with symmetric measurement equations[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(2): 370-375.

[4] GIANNITRAPANI A, SCORTECCI F. Comparison of EKF and UKF for spacecraft localization via angle measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 40(1): 75-84.

[5] THOMAS E. Tracking wild maneuvers at low data-rate using curved track state parameters[C]//IEEE International Radar Conference, 2000: 87-92.

[6] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[7] HAYKIN S. Adaptive filter theory[M]. New York: Pearson Education, 2002.

[8] GREWAL M S, ANDREWS A P. Kalman filtering theory and practice using Matlab[M]. 3rd ed. Wiley Interscience, 2008.

