第 11 卷第 4 期　空 军 工 程 大 学 学 报(自然科学版)　Vol. 11　No. 4
2010 年 8 月　JOURNAL OF AIR FORCE ENGINEERING UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE EDITION)　Aug. 2010

双基地前向散射雷达机动目标跟踪

王辉军[1,2]，　刘卫平[3]，　曹运合[1]，　张守宏[1]
(1. 西安电子科技大学　雷达信号处理国家重点实验室，陕西　西安　710071;2. 94119 部队，甘肃　天水　741020;3. 上海航天电子技术研究所，上海　201109)

摘　要:为进行基于 EKF(Extended Kalman Filter,EKF)的双基地前向散射雷达机动目标跟踪,基于双基地前向散射雷达(Bisktic forward scattering radars,BFSR)在其前向散射区探测隐身目标的能力明显优于单基地雷达的特点,建立常加速度和变加速度 2 种运动模型,使用扩展卡尔曼滤波进行目标跟踪保持,精确估计了运动目标参数(运动轨迹、速度、加速度),为该体制雷达成像、识别奠定了基础。并使用了高斯 – 牛顿迭代算法估计初值,提高了滤波的效率和准确性。通过对匀加速、变加速运动目标仿真,验证了提出模型和算法的有效性。

关键词:EKF;机动目标;前向散射雷达
DOI:10. 3969/j. issn. 1009 – 3516. 2010. 04. 008
中图分类号: TN951　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009 – 3516(2010)04 – 0037 – 05

双基地前向散射雷达在其前向散射区内能对“隐形”目标进行探测[1-5],因此,在对要害部位进行保护及拦截低空突防武器中作用日益凸现。文献[1, 6] 讨论了双基地前向散射雷达对高速运动目标的检测,确定了目标的观测向量多普勒频移和波束到达方向,但目标运动参数与观测向量是非线性关系,且从双基雷达几何配置特性可知,目标在远场多普勒频率、波束到达方向角都较大,但目标回波信号功率比较小,目标在基线附近区域时,目标回波信号功率较大,但目标信号与直达波信号的功率比急剧增大,同时多普勒频率接近零,这给目标参数的估计带来一定的难度。文献[7 – 8]对匀速直线运动目标进行了参数估计,但都是针对匀速目标的研究,本文在其研究基础上对机动目标参数估计进行探讨,建立机动目标观测模型、机动目标状态模型,并运用扩展卡尔曼滤波进行仿真研究。

1　系统模型的建立

βθ 双基地前向散射雷达的几何关系见图 1。图中 T 表示发射机,R 表示接收机,b 表示基线长度,β 表示双基地角,T_g 为目标,θ 为方位角,V 表示目标运动速度,ψ 表示目标运动方向和基线的夹角。

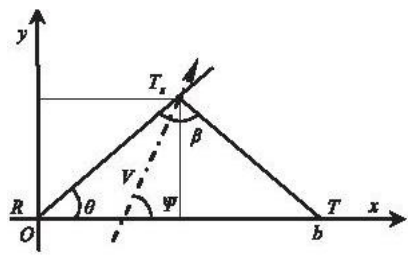

图 1　双基地前向散射几何关系
Fig. 1　Bisktic forward scattering geometry

1)常加速度运动状态模型。目标 T_g 以常加速度 a 运动,此时系统的状态方程可描述为:

$$\boldsymbol{X}(\boldsymbol{k}+1)=\Phi\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{G}v(k) \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{X}(k+1)=[x_{k+1}\ \dot{x}_{k+1}\ \ddot{x}_{k+1}\ y_{k+1}\ \dot{y}_{k+1}\ \ddot{y}_{k+1}]^{\mathrm{T}}$ 为状态向量;$\dot{x}_{k+1}$、$\dot{y}_{k+1}$分别为 $k+1$ 时刻目标在 x、y 方向上的速度;$\ddot{x}_{k+1}$、$\ddot{y}_{k+1}$分别为 $k+1$ 时刻目标在 x、y 方向上的加速度;状态转移矩阵 Φ、过程噪声

* 收稿日期:2009 – 08 – 22
基金项目:国家部委科技预研基金资助项目(5143102015ZS0102)
作者简介:王辉军(1977 –),男,甘肃通渭人,硕士,主要从事双多基地雷达信号检测研究.
E – mail:whjbhy@ yahoo. com. cn

分布矩阵 $\boldsymbol{G}$ 分别为：

$$\Phi=\begin{bmatrix}1 & T & 1/2T^2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & 1/2T^2\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix};\quad \boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}1/6T^3 & 0\\ 1/2T^2 & 0\\ T & 0\\ 0 & 1/6T^3\\ 0 & 1/2T^2\\ 0 & T\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中 T 表示采样间隔。

2）变加速度运动状态模型。利用当前统计模型建模[9]，目标的状态方程为：

$$\boldsymbol{X}(k+1)=\Phi(k)\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{G}(k)\bar{a}+\boldsymbol{V}(k) \tag{3}$$

式中 $\Phi(k)$、输入控制矩阵 $\boldsymbol{G}(k)$ 如式(4)所示：

$$\Phi(k)=\begin{bmatrix}1 & T & (a_xT-1+\mathrm{e}^{-a_xT})/a_x^2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & (1-\mathrm{e}^{-a_xT})/a_x & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \mathrm{e}^{-a_xT} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & (a_yT-1+\mathrm{e}^{-a_yT})/a_y^2\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & (1-\mathrm{e}^{-a_yT})/a_y\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathrm{e}^{-a_yT}\end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{G}(k)=\begin{bmatrix}1/a_x\left(-T+a_xT^2/2+(1-\mathrm{e}^{-a_xT})/a_x\right) & 0\\ T-(1-\mathrm{e}^{-a_xT})/a_x & 0\\ 1-\mathrm{e}^{-a_xT} & 0\\ 0 & 1/a_y\left(-T+a_yT^2/2+(1-\mathrm{e}^{-a_yT})/a_y\right)\\ 0 & T-(1-\mathrm{e}^{-a_yT})/a_y\\ 0 & 1-\mathrm{e}^{-a_yT}\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 a_x，a_y 为机动时间常数的倒数 a 在 2 个方向上的分量，具体值根据实际情况确定，这里假定 $aT\ll 1$，即 T 比机动自相关时间常数 $1/a$ 小得多，在跟踪过程中，如果更新率足够高，则上述假定是合理的。

3）观测模型。根据观测信息，模型的观测方程如下：

$$\boldsymbol{Z}(k)=\boldsymbol{h}(k,\boldsymbol{X}(k))+\boldsymbol{W}(k) \tag{5}$$

式中观测向量 $\boldsymbol{Z}(k)=[f_k\ \theta_k]^{\mathrm{T}}$。由双基地雷达系统基本原理可知：

$$f=1/\lambda\ \mathrm{d}/\mathrm{d}t[R_T+R_R]=1/\lambda\left[\mathrm{d}R_T/\mathrm{d}t+\mathrm{d}R_R/\mathrm{d}t\right] \tag{6}$$

根据双基地几何关系图 1，有 $R_R=\sqrt{x_k^2+y_k^2}$，$R_T=\sqrt{(b-x_k)^2+y_k^2}$，且 $\dot{x}_k=\mathrm{d}x_k/\mathrm{d}t$，$\dot{y}_k=\mathrm{d}y_k/\mathrm{d}t$，观测矩阵满足：

$$\boldsymbol{h}(k,\boldsymbol{X}(k))=\begin{bmatrix}f\\ \theta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\dfrac{1}{\lambda}\left[\dfrac{x_k\dot{x}_k+y_k\dot{y}_k}{\sqrt{x_k^2+y_k^2}}+\dfrac{y_k\dot{y}_k-(b-x_k)\dot{x}_k}{\sqrt{(b-x_k)^2+y_k^2}}\right]\\ \arctan\dfrac{y_k}{x_k}\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：λ 为发射波波长；b 为基线长度。

2 高斯－牛顿迭代算法估计初值

目标最大似然估计的基本原理是对于某个选定的值 ϑ，考虑 x 落在一个小区域内的概率 $p(x|\vartheta)\mathrm{d}x$，取 p

$(x|\vartheta)\mathrm{d}x$ 最大的那个对应的 ϑ 作为估计量 $\hat{\vartheta}_{ml}$。在这里就是根据观测矢量 $\boldsymbol{Z}(k)$ 的概率密度函数 $p(\boldsymbol{Z}(k)|X(k))$ 估计 $\hat{\boldsymbol{X}}(k)$ 的值。在高斯分布中,最优估计定义为:

$$\hat{\boldsymbol{X}}(k)=\operatorname{argmin}\quad \phi_k(\boldsymbol{X}(k)) \tag{8}$$

式中:$\phi_k(\boldsymbol{X}(k))=[\boldsymbol{Z}(k)-\boldsymbol{h}(\boldsymbol{X}(k))]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_R[\boldsymbol{Z}(k)-\boldsymbol{h}(\boldsymbol{X}(k))]$;$\boldsymbol{G}_R=[M\{\Delta\boldsymbol{Z}(k)\Delta\boldsymbol{Z}(k)^{\mathrm{T}}\}]^{-1}$ 表示测量噪声的互相关转置矩阵;$\Delta\boldsymbol{Z}(k)=[\Delta\hat{f}_1,\Delta\hat{\theta}_1,\Delta\hat{f}_2,\Delta\hat{\theta}_2,\cdots,\Delta\hat{f}_k,\Delta\hat{\theta}_k]$ 表示观测噪声向量。

这里采用高斯－牛顿迭代算法逼近近似值:

$$\hat{\boldsymbol{X}}(k)^{i+1}=\hat{\boldsymbol{X}}(k)^{i}+l(\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_R\boldsymbol{H}_k)^{-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_R[\boldsymbol{Z}(k)-\boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{X}}(k)^{i})] \tag{9}$$

式中:$\hat{\boldsymbol{X}}(k)^{i}$ 为第 i 次迭代估计参数向量;$\boldsymbol{H}_k$ 为观测矩阵的线性化;l 为收敛速率。

在这种条件下,该算法能够迅速收敛,有效的估计最大似然方程的解。同时,因为系统的非线性,有时函数 $\phi(\boldsymbol{X}(k))$ 可能仅仅收敛于局部最小,不一定是全局最小值。通过分析局部最小值的位置,在局部收敛域对于参数 $\boldsymbol{X}(k)$ 的最优估计 $\hat{\boldsymbol{X}}(k)$ 的收敛区间可以看出,在整个参数向量的区间内,有许多似然函数 $\phi(\boldsymbol{X}(k))$ 的局部极值。因此,在实际的迭代算法实施中,选取合适的迭代起始点对于函数 $\phi(\boldsymbol{X}(k))$ 的全局收敛有着至关重要的作用。

在现实的算法实施过程中,对于初始迭代点的选取,t_1,t_k 与时刻的观测量 $f_1,\theta_1,f_k,\theta_k$,以及轨迹参数 $x_k,y_k,\dot{x}_k,\dot{y}_k$ 有关。由于 t_1-t_k 时刻波达角 θ 变化较小,根据文献[3]可选取为:

$$\begin{cases} x_k=(\lambda f_kf_1\Delta t+b\theta_1^2f_k-b\theta_k\theta_1f_1)/p; \quad y_k=\theta_kx_k \\ \dot{x}_k=b(f_k\theta_1^2+f_1\theta_k^2-\theta_1\theta_k(f_1+f_k))/(p\Delta t); \quad \dot{y}_k=-\lambda f_kf_1(\theta_1-\theta_k)/p \end{cases} \tag{10}$$

式中:Δt 表示 2 个相邻时间间隔;$p=\lambda f_kf_1\Delta t/b+\theta_1^2f_k-\theta_k^2f_1$。通过带入观测量 $\hat{f}_1,\hat{\theta}_1,\hat{f}_{,k},\hat{\theta}_k$ 到方程组(10),可以得到参数 $\boldsymbol{X}(k)$ 的初始近似,得到较为精确的初值估计。

3　扩展卡尔曼滤波

由于 EKF 已经相当成熟,这里只讨论其初始协方差的计算。直角坐标系下的量测值 $\boldsymbol{Z}(k)$ 近似为:

$$\boldsymbol{Z}(k)=\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \dfrac{\lambda f_kf_1T+b\theta_1^2f_k-b\theta_k\theta_1f_1}{\lambda f_kf_1T/b+\theta_1^2f_k-\theta_k^2f_1} \\ \theta_kx_k \end{bmatrix} \tag{11}$$

观测噪声在直角坐标系下的协方差 $\boldsymbol{R}_s=\boldsymbol{ARA}^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{R}=\mathrm{diag}(\sigma_f^2,\sigma_\theta^2)$,式中:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} \dfrac{\partial x_k}{\partial f_k} & \dfrac{\partial x_k}{\partial \theta_k} \\ \dfrac{\partial y_k}{\partial f_k} & \dfrac{\partial y_k}{\partial \theta_k} \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中:$\dfrac{\partial x_k}{\partial f_k}=\dfrac{(\lambda f_1T+b\alpha_1^2)(\lambda f_kf_1T/b+\theta_1^2f_k-\theta_k^2f)-(\lambda f_kf_1T+b\theta_1^2f_k-b\theta_k\theta_1f_1)(\lambda f_1T/b+\theta_1^2-\theta_k^2f)}{(\lambda f_kf_1T/b+\theta_1^2f_k-\theta_k^2f_1)^2}$;$\dfrac{\partial y_k}{\partial f_k}=\theta_k\dfrac{\partial x_k}{\partial f_k}$;

$\dfrac{\partial x_k}{\partial \theta_k}=\dfrac{-b\theta_1f_1(\lambda f_kf_1T/b+\theta_1^2f_k-\theta_k^2f_1)-2(\lambda f_kf_1T+b\theta_1^2f_k-b\theta_k\theta_1f)\theta_kf_1}{(\lambda f_kf_1T/b+\theta_1^2f_k-\theta_k^2f)^2}$;

$\dfrac{\partial y_k}{\partial \theta_k}=\dfrac{(\lambda f_kf_1T+b\theta_1^2f-2b\theta_k\theta_1f)(\lambda f_kf_1T/b+\theta_1^2f_k-\theta_k^2f)-2(\lambda f_kf_1T+b\theta_1^2f_k-b\theta_k\theta_1f)\theta_kf_1}{(\lambda f_kf_1T/b+\theta_1^2f_k-\theta_k^2f)^2}$。

而初始协方差矩阵为:

$$\boldsymbol{P}(2|2)=\begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{11} & \boldsymbol{P}_{12} \\ \boldsymbol{P}_{12} & \boldsymbol{P}_{22} \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中 $\boldsymbol{P}_{11},\boldsymbol{P}_{12},\boldsymbol{P}_{22}$ 为分块矩阵,且:

$$P_{ij}=\begin{bmatrix} r_{ij}(2) & \frac{r_{ij}(2)}{T} & \frac{r_{ij}(2)}{T^2} \\ \frac{r_{ij}(2)}{T} & \frac{r_{ij}(2)+r_{ij}(1)}{T^2} & \frac{r_{ij}(2)+2r_{ij}(1)}{T^3} \\ \frac{r_{ij}(2)}{T^2} & \frac{r_{ij}(2)+2r_{ij}(1)}{T^3} & \frac{r_{ij}(2)+4r_{ij}(1)+r_{ij}(0)}{T^4} \end{bmatrix} \tag{14}$$

式中 $r_{ij}(k)$ 为 $\boldsymbol{R}_s(k)$ 中对应的元素。

4 仿真结果与分析

仿真参数采用俄罗斯 A. B. Blyakhman 等人研制的双基地前向散射栅栏雷达实验系统中的参数:发射波长 $\lambda=0.77$ m,基线长度 $b=40$ km,假设目标以速度 $v=500$ m/s 与基线成 75°角运动,采样间隔 $T=0.1$ s,y 维从距离基线 8 000 m 处,x 维取基线中点附近,观测误差 $\boldsymbol{R}=\mathrm{diag}(5^2,0.01^2)$,迭代次数 1 000,观测矢量取 24 对,利用 $f_1,\theta_1,f_k,\theta_k$ 求得初始迭代点,初值估计见图 2。

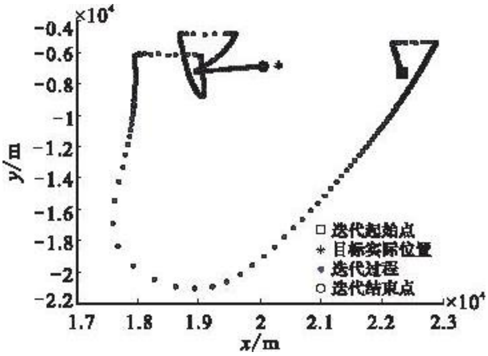

图 2 估计初值

Fig. 2 Estimating targets´ initial

图 2 中估计值逐渐逼近目标真实位置,y 维偏差大小为 20 – 30 m,x 维(基线方向)偏差为 100 – 200 m,该估计为后续的滤波提供了较为精确的初值,满足滤波要求。

对匀加速运动状态进行仿真,目标初始状态 $\boldsymbol{X}_0=[20\,000,200,5,-6\,000,200,5]^{\mathrm{T}}$,对目标进行初值估计得:$\boldsymbol{X}(0)=[20\,102,190,0,-5\,980,205,0]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{P}(2|2)$ 根据式(13)求得,观测误差协方差阵 $\boldsymbol{R}=\mathrm{diag}(5^2,0.01^2)$,仿真时间 40 s,利用匀加速模型对该目标仿真的结果见图 3。

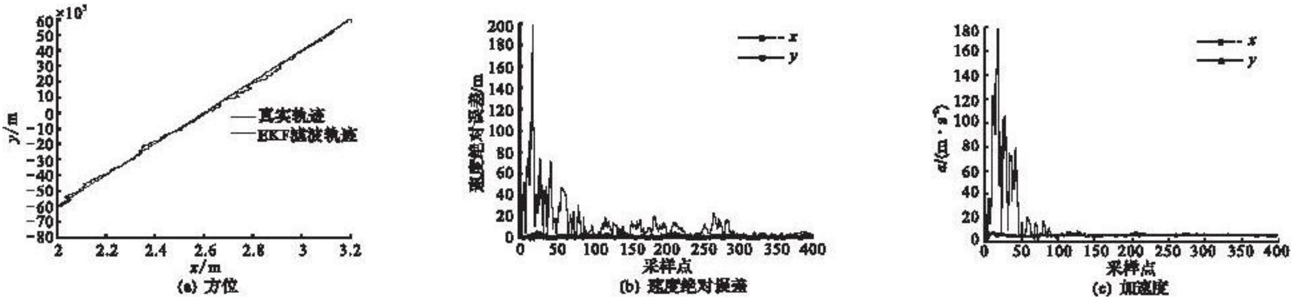

图 3 基于匀加速模型的匀加速目标跟踪仿真

Fig. 3 Results of the simulation of constant acceleration targets tracking based on constant acceleration model

通过仿真可以看出,滤波轨迹较好地拟合了目标真实运动的情况,经过 50 – 100 次迭代后,无论是速度,还是加速度,都基本接近真值。

当目标变加速运动时,运用匀加速模型和当前统计模型进行仿真,仿真时间 33 s,目标初始状态 $\boldsymbol{X}_0=[20\,000,200,0,-10\,000,200,5]^{\mathrm{T}}$,初值估计得:$\boldsymbol{X}(0)=[20\,102,190,0,-10\,980,205,0]^{\mathrm{T}}$,机动环境见表 1。

表 1 目标机动运动情况表

Tab. 1 The movement of target maneuvering

分向加速度	t/s			
	25	0	8	17
$\ddot{x}_{k+1}/(\mathrm{m\cdot s^{-2}})$	0	0	0	0
$\ddot{y}_{k+1}/(\mathrm{m\cdot s^{-2}})$	5	10	0	–10

通常 α 的经验取值范围为:目标机动形式是飞机慢转弯,$1/\alpha$ 的取值为 60 s,对于逃避机动是 20 s,大气扰动是 1 s。这里根据实际,取当前统计模型最大加速度 $a_{\max}=10$ m/s^2,$a_{-\max}=-10$ m/s^2,$a_x=1$,$\alpha_y=1/5$,仿真结果见图 4。

比较 2 种模型下的仿真结果,当前统计模型较好地拟合了目标的真实轨迹,而匀加速模型不能跟踪目标加速度的变化,与之对应的位置信息随之发散。

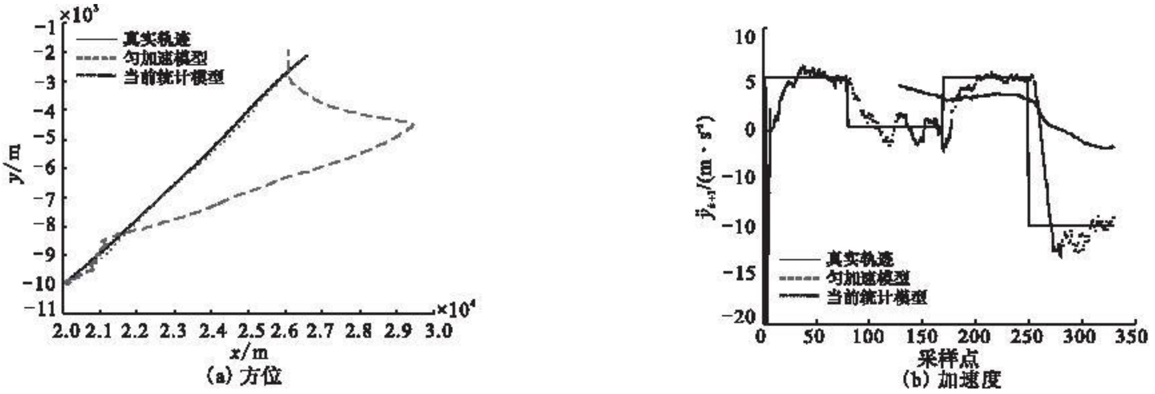

图 4　匀加速模型与当前统计模型对机动目标跟踪的方位、加速度比较

Fig. 4　Comparisons of location and acceleration of maneuvering targets tracking by the constant acceleration model and the current statistical model

5　结束语

本文在高斯 - 牛顿算法估计初值的基础上,完成了基于 EKF 的双基地前向散射栅栏雷达机动目标跟踪。但在实际应用中,不管当前统计模型的自相关时间常数 a,还是最大加速度的取值 a_{max},我们都只能靠经验范围事先设定,而实际情况是实时随机的,所以仿真会在一定程度上偏离实际,但总体来说还是较好地拟合了真实轨迹。对于多目标跟踪问题还有待于深入研究。

参考文献:

[1] Myakinkov A V. Optimal Detection of High - velocity Targets in Forward Scattering Radar[C]//5th International Conference on Antenna Theory and Techniques. Kyiv Ukraine:[s. n],2005:345 - 347.

[2] Blyakhman A B,Runova I A. Forward Scattering Bistatic Radar[C]//PIERS Workshop on Advances in Radar Methods. [S. l.]: PIERS Press,1998:107 - 113.

[3] Myakinkov A V,Ryndyk A G. Space - time Processing in Three - dimensional Forward Scattering Radar [C]//Proceedings of 4th International Conference on Antenna Theory and Techniques. Sevastopol Ukraine:[s. n],2003:9 - 12.

[4] Blyakhman A B, Myakinkov A V, Ryndyk A G. Phased Antenna Arrays in Bistatic Forward Scattering Radar System [C]//Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings. Cambridge. Massachusetts:[s. n],2002:163 - 167.

[5] Howland P E. Target Tracking Using Television—based Bistatic Radar [J]. IEE Proc Radar Sonar Navigation,1999, 146(3): 166 - 174.

[6] Blyakhman A B, Myakinkov A V, Ryndyk A G. Algorithm of Target Tracking for Three Dimensional Bistatic Forward Scattering Radar [C]//Proceedings of 4th International Radar Symposium. Warsaw: [s. n],2004:17 - 21.

[7] 吕孝雷,张守宏,李锘. 双基地前向散射栅栏雷达的目标运动参数估计[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版,2007,34(1):54 - 58.
LÜ Xiaolei,ZHANG Shouhong,LI Nuo. Estimation of the Moving Parameters for Objects in the Bistatic Forward Scattering Barrier Radar[J]. Journal of Xidian University:Natural Science Edition,2007,34(1):54 - 58. (in Chinese)

[8] Blyakhman A B,Ryndyk A G,Sidorov S B. Forward Scattering Radar Moving Object Coordinate Measurement [C]//Radar Conference. [S. l]:IEEE Press,1999:678 - 681.

[9] 何友,修建娟. 雷达数据处理及应用[M]. 北京:电子工业出版社. 2006.
HE You,XIU Jianjuan. Radar Data Processing With Applications[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2006. (in Chinese)

(下转第 94 页)