

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.04.014

引用格式:李邱斌,张贞凯,田雨波.基于射频隐身的采样周期和辐射功率控制方法研究[J].电讯技术,2016,56(4):430-435.[LI Qiubin, ZHANG Zhenkai, TIAN Yubo. Study on sampling period and radiation power control method for radio frequency stealth[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(4):430-435.]

基于射频隐身的采样周期和辐射功率控制方法研究*

李邱斌**,张贞凯,田雨波

(江苏科技大学 电子信息学院,江苏 镇江 212003)

摘要:为进一步提高雷达的射频隐身能力,合理分配相控阵雷达的工作参数,在目标跟踪时,对雷达的采样周期和辐射功率控制方法进行研究。首先,根据目标运动状态的不同,对雷达采样周期与辐射功率自适应设计方法进行分析,在满足系统跟踪性能要求的前提下,建立了控制参数的优化模型;然后,利用粒子群算法优化自适应采样周期和自适应辐射功率等参数,有效地降低了跟踪性能误差,提高了雷达系统的射频隐身性能。与传统的雷达采样周期和辐射功率算法进行了仿真比较,结果表明所提的算法取得了较好射频隐身效果。

关键词:相控阵雷达;射频隐身;采样周期;辐射功率;目标跟踪;粒子群优化

中图分类号:TN958.92 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)04-0430-06

Study on Sampling Period and Radiation Power Control Method for Radio Frequency Stealth

LI Qiubin, ZHANG Zhenkai, TIAN Yubo

(School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In order to improve the radar's ability of radio frequency (RF) stealth and configure phased array radar parameters properly, in radar's target tracking, the method of sampling period and radiation power control is studied. Firstly, according to different target motion state, an optimization model of control parameter is built after the design method of sampling period and adaptive radiation power is analyzed, in order to meet the requirements of tracking performance. Secondly, particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to optimize the sampling period and radiated power, which can reduce the performance tracking error and improve the RF stealth performance of the radar system. Compared with the conventional method of the radar sampling period and radiated power, the proposed algorithm has better RF stealth performance.

Key words: phased array radar; radio frequency stealth; sampling period; radiated power; target tracking; particle swarm optimization

1 引言

射频隐身技术是近年来提出的一种新的隐身技

术,射频隐身是指无源探测设备系统与雷达之间的对抗。无源探测系统相比常规的相控阵雷达具有作

* 收稿日期:2015-09-22;修回日期:2015-11-10 Received date:2015-09-22;Revised date:2015-11-10

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61401179);江苏省属高校自然科学基金资助项目(14KJB510009)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61401179); The Natural Science Fund for Colleges and Universities in Jiangsu Province (14KJB510009)

** 通信作者:qiubin01225@163.com Corresponding author: qiubin01225@163.com

用距离远等优点,这将削弱雷达正常工作能力。雷达在目标跟踪时,由于雷达系统资源有限,需要合理地分配雷达工作参数。因此,增大雷达的采样周期,降低雷达的辐射功率等参数,有利于减少雷达的辐射能量,提高雷达的射频隐身能力。射频隐身技术能有效减小雷达被探测、截获和识别的概率,因此许多学者将雷达的射频隐身研究置于重要地位。

目前,机动目标跟踪在军事和民用领域已得到了广泛应用,在国内外众多学者的共同研究中,已取得丰富的理论成果。文献[1]给出了雷达辐射功率策略下的最优辐射控制方案,自适应调整跟踪的任务,在满足目标跟踪要求的前提下,减小系统辐射能量。而对采样周期参数控制^[2-3],文献[2]综合考虑了采样周期与驻留时间对跟踪性能的影响,利用粒子群优化算法对目标参数进行优化,进一步推动了雷达射频隐身的实现。文献[3]利用跟踪算法中一步预测值的后验克拉美罗矩阵代替预测协方差,提出了自适应周期算法,实现雷达资源的有效利用。文献[4]在目标跟踪时采用灵活的控制方式,对相控阵雷达的参数进行研究,节省了雷达系统资源。文献[5]对雷达射频隐身特性问题展开研究,通过分析雷达功率自适应控制方法,提高了相控阵雷达系统工作效能。文献[6-7]描述了雷达功率对射频隐身性能的影响,构造了相应模型,同时对射频隐身性能进行评估。

上述算法虽然研究了雷达采样周期和辐射功率的控制方法,但大多数文献仅研究单个参数在雷达射频隐身性能方面应用,并未全面考虑采样周期和辐射功率的联合控制问题。本文针对目标跟踪时雷达的参数进行分析,提出射频隐身的采样周期和辐射功率优化控制方法,以自适应采样周期、自适应辐射功率作为优化变量,建立雷达射频隐身的目标跟踪函数,并用粒子群算法对优化模型求解,根据目标运动特性自适应调整跟踪任务的执行参数,在满足目标跟踪要求的前提下,增大采样间隔,减小辐射的能量,提升系统隐身性能。

2 雷达自适应采样周期的分析

在雷达目标跟踪领域,相控阵雷达采用快速改变天线的波束方向,实现雷达目标跟踪,根据目标运动特性,使得采样周期不断更新,当目标处于机动状态,提高跟踪精度,对目标的采样周期进行调整,防

止跟踪的失跟;当目标在非机动状态时,在满足跟踪误差范围内,改变采样周期,充分利用雷达资源,提升目标的跟踪能力,可以降低雷达的工作负载。

采样周期是研究雷达射频隐身性能的重要参数之一,它还影响着雷达跟踪精度。雷达的跟踪精度反映目标滤波估计值与真实值的精确程度,是雷达在跟踪状态下性能的重要指标。因此,满足一定的跟踪精度,合理设计采样周期至关重要。

在雷达目标跟踪中,对自适应采样周期设计方法进行研究。设定一组采样周期序列 $T_i (i=1,2,3, \dots, r)$,根据逼近程度的不同,对目标设定门限值,利用交互多模型(Interactive Multiple Model, IMM)滤波算法求出目标状态的预测误差协方差 $P_{\text{pre}}(k)$,对预测误差协方差与设置的门限值 $\overline{P_{\text{th}}}$ 进行比较,即利用求矩阵的迹来度量跟踪精度是否满足要求,估计出下一时刻的采样周期 $\Delta T(t_k)$ 。采样周期的自适应设计方法可以降低雷达系统资源消耗,求解采样周期的模型如下:

$$\begin{aligned} & \max \Delta T(t_k) \\ & \begin{cases} \text{Tr}[P_{\text{pre}}(k)] \leq \text{Tr}[\overline{P_{\text{th}}}] \\ \Delta T(t_k) \in [T_{\min}, T_{\max}] \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{pre}}(k)$ 为预测误差协方差矩阵估计值; $\overline{P_{\text{th}}}$ 为设定的门限值,即 $\text{Tr}[\overline{P_{\text{th}}}] = \text{Tr}[R]$, R 为量测噪声标准差; T_{\min} 和 T_{\max} 分别为设定采样周期范围的最小值和最大值。

3 雷达自适应辐射功率的分析

在目标跟踪时,雷达的辐射功率受检测概率、目标距离等多方面因素的约束,在一定的虚警概率和检测概率下,由雷达方程表示的最大的作用距离 R_{\max} 为

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 F_R B_{\text{Ri}} L_{\text{RT}} L_{\text{RR}} \text{SNR}_{\min}} \quad (2)$$

式中: P_t 为雷达的辐射功率;发射和接收天线增益分别为 G_t 和 G_r ;目标的雷达截面积(Radar Cross Section, RCS)为 σ ; λ 为信号的波长; k 为玻尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K); F_R 为噪声系数; T_0 为标准的噪声温度(290 K); B_{Ri} 为雷达接收机的带宽; $L_{\text{RT}} L_{\text{RR}}$ 为雷达的损耗; SNR_{\min} 为雷达最小可检测信噪比。

在雷达系统中,对雷达自适应辐射功率的设计

方法进行研究。目标跟踪距离越近,雷达需要发射的功率就越小,减小雷达的辐射功率有利于降低雷达系统资源消耗,进一步提升目标跟踪的射频隐身性能。为了确保雷达能够准确跟踪到目标,同时不被无源探测系统截获,目标跟踪的距离 R 、雷达可探测临界目标距离 $R_{CR} = R_{max}$ 、雷达发射的临界功率 P_{RCRT} 、辐射功率 P_t 必须满足如下条件^[8-9]:

$$\begin{cases} P_t \geq P_{RCRT} \left(\frac{R}{R_{CR}}\right)^4 \\ P_t \leq P_{RCRT} \left(\frac{R}{R_{CR}}\right)^2 \end{cases} \quad (3)$$

对辐射功率进行控制,使其满足条件,即辐射功率随着距离的减小而降低,调整范围在距离的四次方和二次方之间^[9]。

4 目标跟踪射频隐身的性能优化

4.1 约束条件

约束条件表示雷达辐射功率 P_t 与雷达目标跟踪距离的关系,同时受雷达本身性能的限制,而采样周期 $T(t_k)$ 受到目标运动状态和目标运动特性的影响。

由图 1 建立模型优化的流程图可知,雷达对目标进行跟踪时,在满足一定的跟踪精度的要求下,首先,构造不同的目标运动轨迹,然后利用前一滤波周期的所有状态,对各滤波器估计信息的分配,经过各模型卡尔曼滤波,根据模型概率对任意模型可能性计算,最终输出所有模型的状态估计加权,运用 IMM 算法估算出目标的采样周期。为了使雷达更准确地对目标跟踪,提高雷达的射频隐身能力,在满足式(3)条件的前提下,对辐射功率的自适应控制方法进行研究。选取雷达的自适应采样周期和自适应辐射功率等参数,并规定相应的约束条件,建立了优化模型的目标函数。

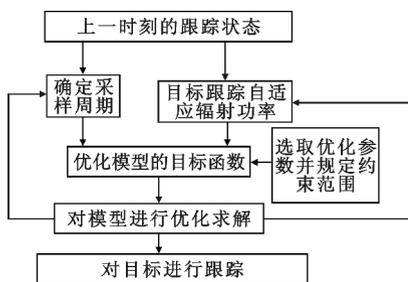


图 1 模型优化流程图

Fig. 1 Model optimization flow chart

本文选用粒子群算法来优化目标参数,粒子群算法通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种智能优化算法。一群随机粒子通过每次的迭代找到最优值,同时每个粒子飞翔的方向和距离受一个速度决定,在每一次迭代中,根据找到的最优值来更新自己,最终得到目前种群的最优解。因此选用粒子群算法来对式(4)和式(5)所示的优化模型求解,从中得出满足约束条件的最优值。

4.2 目标函数

综合雷达的射频隐身能力,对采样周期和辐射功率两方面展开讨论,建立关于射频隐身的研究,构造出适应度函数,并作为目标函数,表达式如式(4)所示:

$$f(t_k) = c_1 \cdot \frac{P(t_k)}{P_0} + c_2 \cdot \frac{T_{max}}{T(t_k)} \quad (4)$$

式中: $P(t_k)$ 为辐射功率; $T(t_k)$ 为采样周期; P_0 为恒定辐射功率; T_{max} 为采样周期范围中最大值, 设为 6 s; $c_1 = c_2 = 0.5$, 这两个参数来表示不同的侧重量。

优化模型如式(5)所示:

$$\begin{cases} \min f(t_k) \\ \Delta T(t_k) \in [T_{min}, T_{max}] \\ \text{Tr}[P_{pre}(k)] \leq \text{Tr}[\overline{P_{th}}] \\ P_t \geq P_{RCRT} \left(\frac{R}{R_{CR}}\right)^4 \\ P_t \leq P_{RCRT} \left(\frac{R}{R_{CR}}\right)^2 \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)所述目标函数的含义,减小雷达辐射功率,同时尽可能增大采样周期,可选择式(5)的极小化值,降低雷达系统资源消耗,改善射频隐身性能。

算法的具体步骤如下:

Step 1 构造目标的运动轨迹,设定目标初始状态变量和期望协方差矩阵;

Step 2 选用粒子群智能优化算法,把采样周期 $T(t_k)$ 和辐射功率 $P(t_k)$ 作为粒子,设定粒子活动范围和速度,确定交互多模型跟踪算法的目标模型;

Step 3 优化目标函数 $f(t_k)$, 并对目标函数进行求解;

Step 4 选取出采样周期和辐射功率等参数,对目标进行采样,采样周期 $T(t_k)$ 越大,辐射功率

$P(t_k)$ 越小,越接近下一时刻跟踪选取的目标;

Step 5 对目标初始变量和误差协方差矩阵进行不断更新,回到 Step 3,自适应地选择下一时刻的采样周期和辐射功率,直到结束。

5 仿真结果与分析

仿真主要目的是验证本文所提优化后的自适应采样周期和自适应辐射功率 (Optimized Adaptive Sampling Period and Adaptive radiation Power, OASP) 算法的有效性,并与固定采样周期和固定辐射功率 (Fixed Sampling Period and Fixed radiation Power, FSPFP) 算法、自适应采样周期和自适应辐射功率^[10] (Adaptive Sampling Period and Adaptive radiation Power, ASPAP) 算法在射频隐身效果方面进行评估。

假设雷达恒定辐射功率为 60 kW,固定采样周期为 4 s。设目标与载机在同一水平面,目标的初始状态 $(x_0, x_0', x_0'', y_0, y_0', y_0'')$ 为 $(0 \text{ m}, 30 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2, 200 \text{ m}, 0 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}^2)$, IMM 算法滤波模型中采用 3 个模型进行交互,选机动目标跟踪模型 1 为匀速直线运动,模型 2 为匀加速直线运动模型,模型 3 为转弯运动模型,模型初始概率为 $(0.25, 0.5, 0.25)$,马尔可夫概率转移矩阵 $P = (0.95, 0.025, 0.025; 0.025, 0.95, 0.025; 0.025, 0.025, 0.95)$,总仿真时间为 300 s,进行 300 次 Monte Carlo 仿真。目标运动轨迹如表 1 所示。

表 1 目标运动轨迹
Tab.1 The target trajectory

时间段/s	x 加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	y 加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
1 ~ 120	0	0
121 ~ 180	2	2
181 ~ 240	-4	6
241 ~ 300	6	-3

目标运动轨迹如图 2 所示,在图 3 采样周期仿真和图 4 辐射功率仿真比较中,自适应采样周期^[11] (Adaptive Sampling Period, ASP) 和所提算法优化后采样周期 (Optimization Adaptive Sampling Period, OASP) 均大于固定周期 (Fixed Sampling Period,

FSP)。辐射功率随距离的改变而调整,自适应辐射功率^[11] (Adaptive Radiation Power, ARP) 和所提算法优化后辐射功率 (Optimization Adaptive Radiation Power, OARP) 均小于固定辐射功率 (Fixed Radiation Power, FRP)。

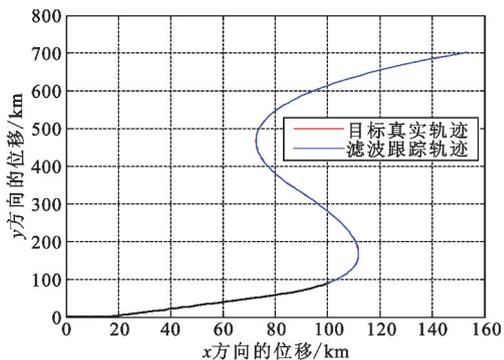


图 2 目标的运动轨迹
Fig.2 The target trajectory

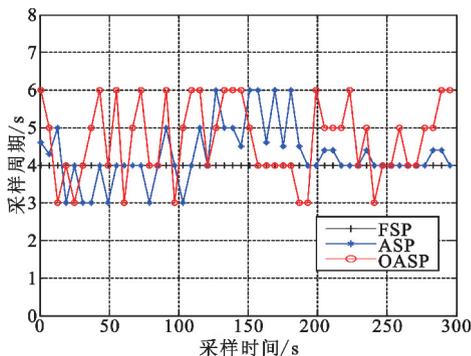


图 3 采样周期仿真比较
Fig.3 Comparison of sampling period simulation

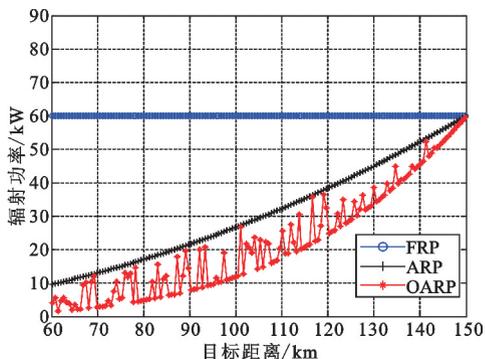


图 4 辐射功率仿真比较
Fig.4 Comparison of radiation power simulation

目标位移误差和速度误差分别如图 5 和 6 所示。仿真结果表明算法具有较好的跟踪性能。

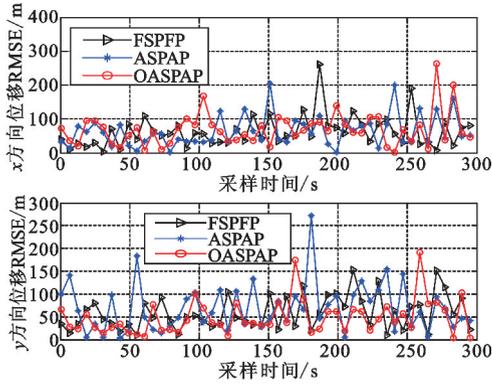


图5 位移均方根误差

Fig. 5 Position root mean square error

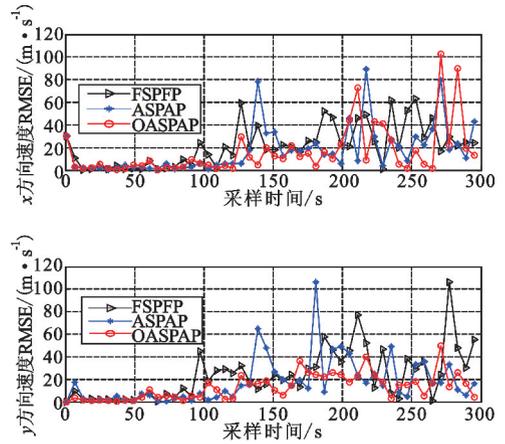


图6 速度均方根误差

Fig. 6 Velocity root mean square error

为进一步量化算法的射频隐身和目标跟踪性能,仿真对采样周期、辐射功率和跟踪误差等参数进行了量化比较,如表2所示。由表2可知,本文算法具有较好跟踪性能的同时,增大了跟踪过程中的采样周期,降低了辐射功率。固定采样周期和固定辐射功率(FSPFP)算法 x 方向、 y 方向位移均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)与自适应采样周期和自适应辐射功率(ASPAP)算法 x 方向、 y 方向位

移均方根差 RMSE 相比,分别降低约 1% 和 10%;与本文算法 x 方向、 y 方向的位移 RMSE 相比,分别降低约 17% 和 19%。固定采样周期和固定辐射功率(FSPFP)算法 x 方向、 y 方向的速度 RMSE 与自适应采样周期和自适应辐射功率(ASPAP)算法 x 方向、 y 方向的速度 RMSE 相比,分别降低约 5% 和 0.5%;与本文算法 x 方向、 y 方向的速度 RMSE 相比,分别降低约 18% 和 17%。

表2 算法性能的比较

Tab. 2 Performance comparison of algorithms

算法	采样周期/s	平均辐射功率/kW	位移 RMSE/m		速度 RMSE/(m · s ⁻¹)	
			x 方向	y 方向	x 方向	y 方向
FSPFP	4.000 0	60.000 0	68.812 5	69.717 3	21.381 8	23.559 0
ASPAP	4.294 0	31.284 3	67.469 5	62.745 6	20.312 7	23.441 2
OASPAP	4.760 0	22.607 5	56.565 3	56.471 0	17.533 1	19.554 0

6 结论

在对相控阵雷达射频隐身性能研究中,本文从目标跟踪状态参数控制角度出发,提出了自适应采样周期和自适应辐射功率设计方法,并建立目标优化模型,在满足跟踪性能条件下,最终得出了采样周期和辐射功率,并对仿真的结果进行相应的分析,为改善雷达的射频隐身性能提供了一定的理论依据。

参考文献:

[1] 廖俊,于雷,俞利新,等. 基于 LPI 的相控阵雷达辐射控制方法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(12):2638-2642.

LIAO Jun, YU Lei, YU Lixin, et al. Method of radiation control for phased array radar based on LPI[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(12): 2638-2642. (in Chinese)

[2] ZHANG Z K, ZHOU J J, WANG F, et al. Multiple-target tracking with adaptive sampling intervals for phased-array radar[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(5): 760-766.

[3] 郁卫华,朱翔,朱晓华. 基于交互式多模型粒子滤波的相控阵雷达自适应采样[J]. 电子设计工程, 2012, 20(5): 29-32.

YU Weihua, ZHU Xiang, ZHU Xiaohua. Adaptive sampling method for phased array radar based on interacting multiple model particle filter[J]. Electronic Design Engi-

- neering, 2012, 20(5):29-32. (in Chinese)
- [4] NARYKOV A S, KRASNOV O A, YAROVY A. Algorithm for resource management of multiple phased array radars for target tracking[C]// Proceedings of 16th International Conference on Information Fusion. Istanbul, Turkey: IEEE, 2013:1258-1264.
- [5] 宋海方, 吴华, 邬蒙, 等. 雷达干扰射频隐身特性及自适应功率控制方法[J]. 电讯技术, 2012, 52(12):1934-1938. SONG Haifang, WU Hua, WU Meng, et al. RF stealth characteristic of radar jamming and adaptive power control method [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(12):1934-1938. (in Chinese)
- [6] 廖雯雯, 程婷, 何子述. MIMO 雷达射频隐身性能优化的目标跟踪算法[J]. 航空学报, 2014, 35(4):1134-1141. LIAO Wenwen, CHENG Ting, HE Zishu. A target tracking algorithm for RF stealth performance optimization of MIMO radar [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(4):1134-1141. (in Chinese)
- [7] ZHAO S Y, CHENG T. Research on MIMO radar RF stealth algorithm in searching mode[C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Guilin: IEEE, 2014:88-93.
- [8] 阮淑芬, 崔占涛, 张杰. 射频辐射功率控制原理与实现方法研究[J]. 现代雷达, 2015, 37(1):17-20. RUAN Shufen, CUI Zhantao, ZHANG Jie. A study on Principle of RF radiation power control and its implementation method [J]. Modern Radar, 2015, 37(1):17-20. (in Chinese)
- [9] 廖俊, 于雷, 周中良, 等. 机载相控阵雷达探测参数优化[J]. 仪器仪表学报, 2012(33):2487-2494. LIAO Jun, YU Lei, ZHOU Zhongliang, et al. Optimizing detection parameters of airborne PAR [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012(33):2487-2494. (in Chinese)

- [10] 张贞凯, 周建江, 田雨波, 等. 基于射频隐身的采样间隔和功率控制设计[J]. 现代雷达, 2012, 34(4):19-23. ZHANG Zhenkai, ZHOU Jianjiang, TIAN Yubo, et al. Design of sampling interval and power base on radio frequency stealth [J]. Modern Radar, 2012, 34(4):19-23. (in Chinese)
- [11] 王峰, 张洪才, 潘泉. 相控阵雷达采样周期自适应策略研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(9):1230-1233. WANG Feng, ZHANG Hongcai, PAN Quan. A study on adaptive sampling period of phased array radar [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(9):1230-1233. (in Chinese)

作者简介:



李邱斌(1989—),男,安徽宿州人,2013年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理;

LI Qiubin was born in Suzhou, Anhui Province, in 1989. He received the B. S. degree in 2013. He is now a graduate student. His research direction is radar signal processing.

Email:qiubin01225@163.com

张贞凯(1982—),男,江苏徐州人,讲师,主要研究方向为雷达信号处理、雷达射频隐身;

ZHANG Zhenkai was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1982. He is now a lecturer. His research concerns radar signal processing and radar radio frequency stealth.

Email:zzk@nuaa.edu.cn

田雨波(1971—),男(满族),辽宁铁岭人,博士,教授、硕士生导师,主要研究方向为计算机智能及其电磁学应用。

TIAN Yubo was born in Tieling, Liaoning Province, in 1971. He is now a professor with the Ph. D. degree and also the instructor of graduate students. His research concerns computational intelligence and electromagnetic fields.