

基于多组重频相参积累的多普勒解模糊方法

王立坤,周琳,郭琰

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:脉冲多普勒体制雷达一般需要对多组不同脉冲重复频率 (PRF) 的脉冲组分别进行处理和检测, 该文研究了多组 PRF 相参积累的方法, 将不同 PRF 的脉冲组作为一组进行处理, 使各 PRF 脉冲组回波能够相参积累, 只需要对一帧数据进行检测即可解模糊, 改善了传统方法由于分别检测造成低信噪比时检测性能较差的问题。分析了各参数对检测结果的影响并以处理结果的主副瓣比作为适应度评价价值, 通过遗传算法快速搜索满足需要的参数组合, 减少了搜索数目。仿真实例说明了使用遗传算法可有效获得具有优良性能的参数组合, 不仅检测性能得到有效提升, 还较大幅度地降低了成功解模糊所需的信噪比。

关键词:解速度模糊; 脉冲重复周期; 遗传算法

中图分类号: TN957.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7859(2020)03-0035-05

引用格式:王立坤, 周琳, 郭琰. 基于多组重频相参积累的多普勒解模糊方法[J]. 现代雷达, 2020, 42(3): 35-39.
WANG Likun, ZHOU Lin, GUO Yan. Velocity ambiguity resolution based on coherent integration of multiple PRF [J]. Modern Radar, 2020, 42(3): 35-39.

Velocity Ambiguity Resolution Based on Coherent Integration of Multiple PRF

WANG Likun, ZHOU Lin, GUO Yan

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Pulse Doppler radar generally needs to process and detect multiple sets of different pulse repetition frequency (PRF) pulse groups. Different from the multi-frequency variation mode, this paper studies the method of multi-group PRF coherent integration. PRF of different frequencies is processed as a group, so that the echoes of each PRF pulse group can be coherently accumulated, and only one frame of data needs to be detected, which improved poor detection performance of the traditional method due to separate detection. The influence of each parameter on the detection result is analyzed and the main side-lobe ratio of the processing result is used as the fitness evaluation value. The genetic algorithm is used to quickly search for the required parameter combination and reduce the number of searches. The simulation example shows that the proposed method can efficiently obtain the parameter combination with excellent performance by genetic algorithm, the detection performance is effectively improved and the requirement of signal-to-noise ratio for successful ambiguity resolution is greatly reduced.

Key words: resolving velocity ambiguity; pulse repetition interval; genetic algorithm

0 引言

由于脉冲多普勒 (PD) 技术可以很方便地进行杂波抑制处理, 在雷达上获得了广泛的应用^[1]。对于低重频的动目标指示 (MTI) 或 PD 雷达来说, 多普勒模糊现象会在被抑制的杂波多普勒频率处产生周期性的盲速区域, 从而对目标检测性能产生较大的影响^[2]。低重频雷达一般采用多组低脉冲重复频率 (PRF) 参差的方式对一组不同重频的视在多普勒频率模糊值进行解模糊处理并克服盲速问题。文献[3]讨论了速度模糊的出现以及给出求解不模糊频率的方法, 文献[4]利用中国余数定理 (CRT) 及类似原理来解决多重频下

的模糊分辨问题, CRT 法由于只能估计整数从而使估计值与实际值相差较大。文献[5]给出了一种适用于多载频多输入多输出 (MIMO) 雷达的解模糊方法。一维集算法^[6]可以处理非整数的测量值, 但需要分别检测多帧数据并对估计值进行遍历。对于脉冲多普勒雷达距离速度模糊问题的研究成果还有很多, 文献[7]改进了交错脉冲方法, 使之更具实时性, 文献[8]基于多普勒谱的稀疏性提出了一种改进的复值迭代自适应方法, 文献[9]利用极大似然估计对真实值进行估计。

本文提出一种基于多组重频相参积累的解模糊方法, 该方法在多组 PRF 方式下进行相参处理, 以运算量为代价在一帧数据里直接获得不模糊频率的同时使信噪比提升约 6 dB, 并采用了遗传算法^[10]减小搜索 PRF 与不同 PRF 脉组间隔的组合数目, 快速得到能够

满足要求的参数组合。

1 多重频解模糊

基于余数定理可以通过检测多个模糊多普勒频率解得不模糊频率,但在低信噪比情况下,较低的检测率会大大影响解模糊成功率。

多组重频中各组的 PRI 取值在原理上应该满足比值尽量靠近 1,可以获得较大的最大无模糊速度区间,实际中需要根据系统和目标多普勒频率范围选择参数。当两个 PRI 之比为

$$Tr_1:Tr_2=M:W \tag{1}$$

且 M, W 互为质数时,最大不模糊频率为

$$f_{\max}=M/Tr_1=W/Tr_2 \tag{2}$$

PRF 值是脉冲体制雷达波形的关键参数,对给定的 PRF 值 f ,不模糊距离和不模糊径向速度分别为

$$\begin{cases} R=\frac{c}{2\cdot f} \\ v=\frac{\lambda\cdot f}{2} \end{cases} \tag{3}$$

式中: c 为光速; λ 为波长。

对于低重频雷达来说,较小的 PRF 值 f 可以使不模糊距离 R 超出雷达的最大作用距离不会出现距离模糊现象,但也会使得不模糊径向速度 v 远小于目标实际径向速度从而造成多普勒模糊现象。低重频雷达需要采用多重 PRF 的方式克服盲速问题,通过解模糊处理扩大测速的不模糊范围。

如图 1 所示,该帧数据的信噪比只有 10.9 dB,当目标因距离较远、RCS 较小导致回波信噪比较小时,多帧都能检测成功的概率很低,因此本文通过只使用一帧数据检测来提高回波信噪比较低时的解模糊成功率。

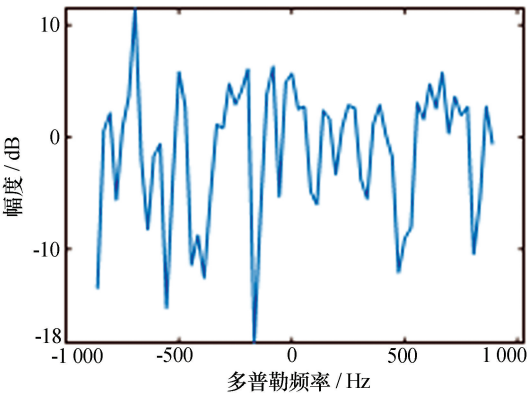


图 1 一帧回波信噪比数据

2 多组重频的相参积累

通过将多重频进行相参积累后进行检测,避免了检测率不高时解模糊成功率低的情况。以运算量为代

价提高了约 6 dB 的信噪比的同时,产生了副瓣,将通过搜索合理的参数降低主副瓣比。对于低重频雷达的多组重频相参积累方式,即在同一个相参处理期(CPI)内以某一脉冲重复周期 Tr_1 发射 n 个脉冲,间隔 t_1 时间,接着以不同的重复周期继续发射下一组脉冲。以四组 PRF 为例, $f_1=1.82\times10^3$ Hz, $f_2=1.73\times10^3$ Hz, $f_3=1.70\times10^3$ Hz, $f_4=1.67\times10^3$ Hz,每段脉冲数为 64,每段脉冲间隔时间为 $t_1=6.28\times10^{-4}$ s, $t_2=5.98\times10^{-4}$ s, $t_3=5.68\times10^{-4}$ s,脉冲时序如图 2 所示。

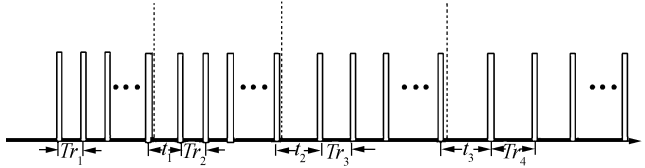


图 2 脉冲采样时序

设计目标多普勒频率为 $f_d=1\ 300$ Hz,回波信号可表示为

$$\exp(j2\pi\cdot f_d\cdot t) \tag{4}$$

并添加噪声,信噪比为-7 dB。

与常规的基于快速傅里叶变换(FFT)方法来得到每个子 CPI 数据的多普勒谱的途径不同,本文基于多组 PRF 相参积累的思想,通过离散傅里叶变换将不同 PRF 的脉冲组作为一组进行处理,使各 PRF 脉冲组回波能够进行相参积累。

基于常规方法得到每组的信噪比分别为:[11.8 dB 12.3 dB 10.5 dB 11.0 dB],采用组间处理的方法信噪比为:17.3 dB,提升约 5.7 dB,提高了对目标的检测效果。

如图 3 所示,回波数据信噪比只有 11.6 dB,检测概率无法达到 1,并且传统方法需要将四组模糊的多普勒频率全部检测后才能进行处理,在目标低信噪比的条件下解模糊成功率很低。

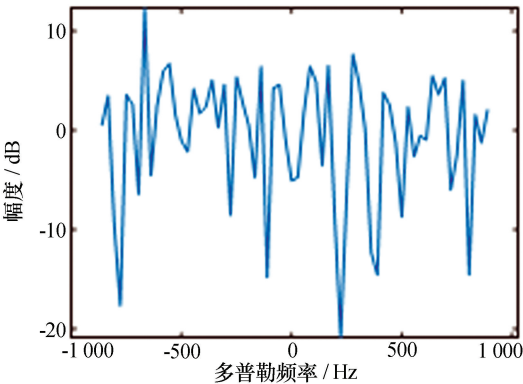


图 3 传统方法第一组回波数据

与传统方法相比,在不减小无模糊频率范围的同

时,多重频相参处理的方法不仅可以直接估计无模糊多普勒谱,还提高了信噪比,有利于目标检测。该方法与一维集算法类似,是一种遍历性的算法,需要对模糊速度进行拓展从而得到解模糊结果。为减小运算量,可在最大无模糊多普勒频率区间内根据需要选取一部分频率区间进行相参处理,图 4 范围以 20 000 Hz 为例,在 X 波段下的目标速度最大为 300 m/s。

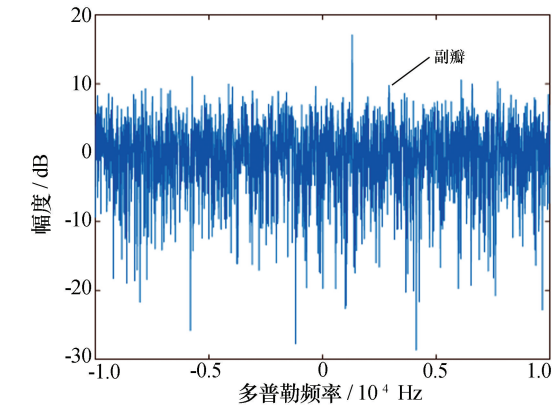


图 4 组内相参处理结果

相参处理之后,得到了约 6 dB 的信噪比增益,但是没有在正确多普勒频率位置积累的频率信号会成为副瓣,如图 5 所示,主副瓣比会影响检测。

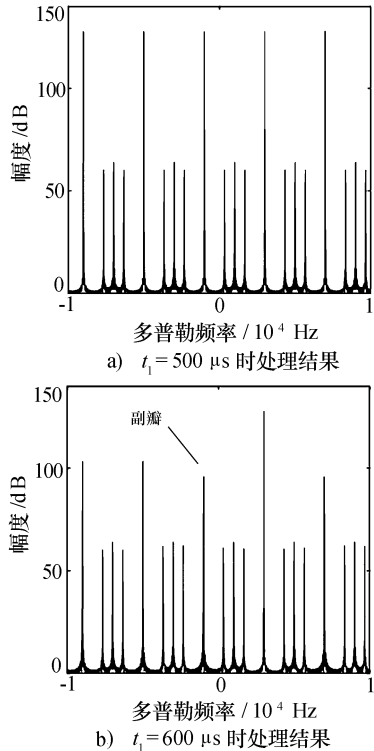


图 5 组间间隔时间对结果的影响

在本例中,有两组不同的重复频率。当多普勒频率为 3 000 Hz,每组脉冲重复周期 $Tr_1 = 500 \mu s$, $Tr_2 = 750 \mu s$ 时,改变脉冲组间间隔时间 t_1 的值可以得到如下结果:当 $t_1 = 500 \mu s$ 时,多普勒不模糊范围为 4 kHz,在

20 kHz 的范围里会出现 5 个模糊值。改变 t_1 后,由于该值与两个 PRI 值都不同,可以视为有三种重频,由于这个脉冲的影响,使得最大不模糊周期进一步扩大,相当于使用三种重复频率进行解模糊处理,正确的多普勒频率可被直接检测。与此同时,在原来模糊位置的频率幅度降低成为副瓣影响检测。

从图 5 中可以看出此时副瓣成为影响检测结果的主要因素,主副瓣比受不同的重频及重频间的间隔影响,为了在满足雷达参数设置合理的基础上得到最优解,需要对重频和重频间隔进行搜索得到主副瓣比最大的最优组合。

3 遗传算法搜索参数组合

遗传算法是一种并行、高效、全局搜索的方法,它可以在搜索过程中自动获取和积累搜索空间中的信息,并可以通过控制搜索过程以求得符合要求的最优结果。由于遗传算法具有对参数的编码进行操作时不需要推导和附加信息、寻优规则不确定、自组织、自适应和自学习性的特点,在设计好适应度评价函数之后,可以用于高效地搜索出满足要求的 PRI 参数组合。

3.1 遗传算法设计

与文献[10]类似,算法设定为:种群规模为 100;为了搜索的便利性,采用十进制编码,直接使用脉冲重复周期和不同重频脉冲组的间隔作为个体基因;变异概率为 0.1;变异的跨度与适应度有关,适应度越低,变异的幅度越大,以增强局部搜索和全局搜索的能力;交叉概率为 0.7。

适应度函数的选取:如上文所述, Tr 与 t 的取值会影响副瓣的幅值,副瓣位置与主瓣位置距离取决于不同重频产生的模糊值大小,由于实际条件限制 PRI 取值范围,此时主副瓣比成为影响检测性能的主要因素,因此选取主副瓣比作为适应度函数来评价检测性能。

3.2 仿真结果及分析

仿真采用四个不同的 PRF 参数进行组合,且波动范围限制在 10 以内,均为 16 脉冲,目标多普勒频率为 3 000 Hz。得到的参数组合 $[Tr_1 Tr_2 Tr_3 Tr_4 t_1 t_2 t_3]$ 分别为 $[505 523 538 547 968 1041 684] \mu s$,主副瓣比为 8.49 dB,进化代数为 119,如图 6 所示。

上文已经讨论,副瓣由模糊频率位置的信号产生,因此每组的 PRF 可选范围越大组数越多,各重频的模糊频率位置就会相差越大,不易积累,主副瓣比就会相应提升,在 500 μs 附近波动 20 时,主副瓣比可以达到 11 dB 以上,具体的参数应综合不模糊频率范围和实际条件限制进行选择。若继续增加脉冲数或者重频数,则信噪比将会由于相参积累提升,在本次仿真条件下,信噪比达到 18 dB 较传统方法提升约 6 dB。

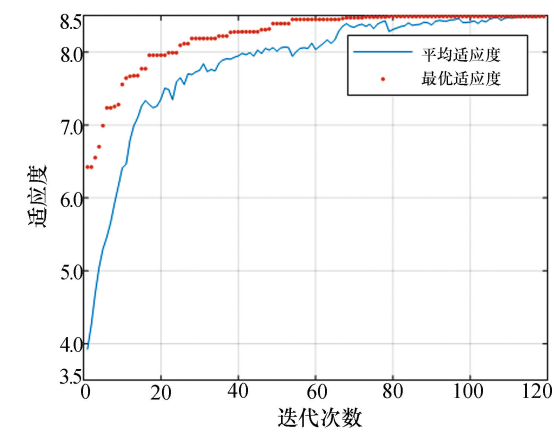


图6 遗传算法仿真结果

若采用常规的穷举法搜索,每组 PRI 均为 $500\text{ }\mu\text{s} \sim 550\text{ }\mu\text{s}$,PRI 组间间隔为 $550\text{ }\mu\text{s} \sim 1\text{ }100\text{ }\mu\text{s}$,精度为 $1\text{ }\mu\text{s}$,则组合数超过 1×10^{15} ,这种运算量过于巨大。仿真时每次迭代个体数目为100,迭代了119次,共运算了11 900 种组合。从仿真结果看,遗传算法对比穷举法可以大大减少搜索运算量,并且获得主副瓣比最优的参数组合,可以满足检测要求。

在性能仿真中,使用上述通过遗传算法得到的参数组合,并对比相同条件下一维集方法的解模糊成功率。信号中添加高斯白噪声,信噪比从 0 dB 开始逐步增加,步长为 0.1 dB,并在每种信噪比下进行 200 次 Monte Carlo 实验。得到信噪比与解模糊成功率,如图 7 所示。

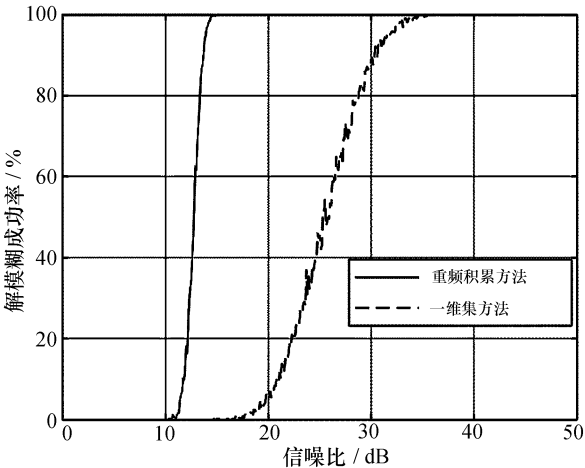


图7 解模糊成功率与信噪比关系

得益于积累得到的信噪比增益,解模糊需要的最小信噪比提升约 6 dB。与普通多重频解模糊方法对比,由于只需要一帧数据即可解模糊,使解模糊成功率为 100%时的抗噪声性能提升了近 20 dB,有效地提高了在目标距离较远、目标较小导致的回波信噪比低时的解模糊成功率,在 14 dB 时解模糊成功率可以达到 100%。

在算法的运算量的方面,若有 n 种重频,每段脉冲

数为 m ,且雷达需要探测目标的最大多普勒频率为 f_{\max} ,则运算量为

$$\begin{cases} \text{乘法: } 4 \times nm \times nm \\ \text{加法: } 2 \times nm + 2 \times nm \times (nm - 1) \end{cases} \quad (5)$$

而同样是遍历性的一维集算法,若仅计算相邻 k 个值的均方差,则运算量为

$$\begin{cases} \text{乘法: } 2nm \times lbm + \left[\sum_{i=1}^n m_i - (k - 1) \right] \times (n + 2) \\ \text{加法: } 2nm \times lbm + \left[\sum_{i=1}^n m_i - (k - 1) \right] \times (3m - 2) \end{cases} \quad (6)$$

式中: m_i 为每种重频在 f_{\max} 下的最大模糊度。当需要搜索的多普勒频域范围较大或者需要精度较高时,该算法的运算量会大大增加。本例中 4 种重频,每种频率脉冲数为 16,且 $f_{\max} = 10\text{ }000\text{ Hz}$ 时,本文方法需要做 16 384 次乘法和 8 192 次加法,而仅计算相邻 4 个值的一维集方法需要 734 次乘法和 2 470 次加法。运算量约是传统方法的 7.7 倍。

随着新技术的不断发展,信号与数据处理设备的计算能力得到大幅提升,新的非均匀傅里叶变换快速算法与实现方案也在不断提出。与其他算法相比,该方法以运算量为代价在一帧数据直接获得多普勒频率的同时提高检测性能,信噪比提升至少 6 dB。

4 结束语

针对脉冲多普勒体制雷达的多普勒解模糊问题,本文提出一种基于多组 PRF 相参积累的多普勒解模糊方法,分析了各参数对处理结果的影响,并通过遗传算法给出了性能优良的参数组合,实现了在直接估计无模糊多普勒谱的同时提高了目标检测性能,从而在低信噪比时可以正确解模糊,对脉冲多普勒雷达的目标检测具有一定的参考价值。仿真结果表明:本文采用的方法可以高效地得到合理的参数组合进行多普勒解模糊处理。

参考文献

[1] 张 弓. PD 雷达信号处理若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2002.
ZHANG Gong. Study on the key techniques of signal processing in PD radar[D]. Nanjing: University of Aeronautics and Astronautics, 2002.
[2] SEDIVY P. Radar PRF staggering and agility control maximizing overall blind speed[C]// 2013 Conference on Microwave Techniques. Pardubice: IEEE Press, 2013: 197–200.
[3] 张代忠,洪 一,邱 炜. 脉冲多普勒雷达中的解模糊算法及实现[J]. 雷达科学与技术,2004(5): 40–44.

- ZHANG Daizhong, HONG Yi, QIU Wei. Ambiguity resolution algorithms for pulse Doppler radar and their realizations[J]. Radar Science and Technology, 2004, 2(5): 40-44.
- [4] CHANG C Y, CURLANDER J C. Application of the multiple PRF technique to resolve Doppler centroid estimation ambiguity for spaceborne SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 941-949.
- [5] 秦国栋, 陈伯孝, 陈多芳, 等. 多载频 MIMO 雷达解速度模糊及综合处理方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1696-1700.
- QIN Guodong, CHEN Baixiao, CHEN Duofang, et al. Velocity ambiguity resolution and synthesis processing in multi-frequency MIMO radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(7): 1696-1700.
- [6] 李萌辉, 李明. 基于一维集搜索方法的 PD 雷达解距离模糊高效算法[J]. 电子信息对抗技术, 2010, 25(5): 22-25.
- LI Menghui, LI Ming. A high efficiency algorithm of PD radar for range ambiguity resolution based on the one-dimension method[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2010, 25(5): 22-25.
- [7] 朱晓华, 陆锦辉, 许佰魁. 一种改进的交错脉冲解速度模糊方法[J]. 现代雷达, 2002, 24(6): 34-36.
- ZHU Xiaohua, LU Jinhui, XU Baikui. A modified staggered pulse method for resolving velocity Ambiguity[J]. Modern Radar, 2002, 24(6): 34-36.
- [8] SUN J, TIAN J, WANG G, et al. Doppler ambiguity resolution for multiple PRF radar using iterative adaptive approach[J]. Electronics Letters, 2010, 46(23): 1562-1563.
- [9] ZHAO K R, LI Y, HU Y Z, et al. Research on new algorithm of dealing with distance ambiguity for high frequency PD radar[C]// 2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). Phuket: IEEE Press, 2016.
- [10] 华瑶, 孙晓闻. 遗传算法搜索雷达脉冲重复周期[J]. 现代雷达, 2016, 38(8): 17-19.
- HUA Yao, SUN Xiaowen. Pulse repetition interval of searching radar under genetic algorithm[J]. Modern Radar, 2016, 38(8): 17-19.
-
- 王立坤 男, 1995 年生, 硕士研究生. 研究方向为雷达信息处理。
- 周琳 女, 1971 年生, 研究员级高级工程师. 研究方向为预警探测、数据融合、系统集成、雷达仿真等。
- 郭琰 男, 1980 年生, 博士. 研究方向为预警协同探测、数据融合处理。
-
- (上接第 34 页)
- [2] SKOLNIK M I. Radar handbook [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2010.
- [3] DELONG D, HOFSTETTER E. Optimum radar signal-filter pairs in a cluttered environment[J]. IEEE Transactions Information Theory, 1970, 16(1): 89-90.
- [4] 贾可新, 张锦中. 一种改进的最大信杂比 MTD 滤波器设计算法[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(2): 47-51.
- JIA Kexin, ZHANG Jinzhong. An algorithm of designing modified maximum signal-to-clutter ratio MTD filter bank[J]. Fire Control Radar Technology, 2017, 46(2): 47-51.
- [5] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- WU Shunjun, MEI Xiaochun. Radar signal processing and data processing technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [6] RICHARDS M A. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- RICHARDS M A. Fundamentals of radar signal processing [M]. XING Mengdao, WANG Tong, LI Zhenfang, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [7] 彭应宁, 张文涵, 王秀坛, 等. 动目标检测 (MTD) 滤波器组的优化设计新算法[J]. 电子学报, 1992, 20(3): 9-13.
- PENG Yingning, ZHANG Wenhan, WANG Xiutan, et al. A novel algorithm for optimal design of filter banks in MTD[J]. Acta Electronica Sinica, 1992, 20(3): 9-13.
- [8] 袁亚湘. 非线性优化计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- YUAN Yaxiang. Nonlinear optimization calculation method [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [9] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- CHEN Baolin. Optimization theory and algorithm[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [10] 宋翌, 阳彩霞, 魏妮妮. 一种基于内点算法的三重目标过滤器优化算法的研究与仿真[J]. 科技导报, 2013, 31(1): 62-65.
- SONG Yi, YANG Caixia, WEI Nini. Research and simulation on the triple-objective filter optimization algorithm based on interior point algorithm[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(1): 62-65.
-
- 喻荣梅 女, 1988 年生, 硕士, 工程师. 研究方向为雷达信号处理。
- 张仕元 男, 1975 年生, 博士, 研究员级高级工程师. 研究方向为目标识别与雷达信号处理等。