

情报雷达威力衔接问题研究

朱新国

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:针对目标隐身化和电磁环境日益复杂化发展趋势,系统阐述了隐身目标和有源干扰引起的威力衔接问题,指出上述两种场景下系统主波束与补盲波束切换易出现中近区探测不连续,其原因主要由系统补盲设计不合理引起。从理论上推导了上述两种场景下为避免威力衔接问题补盲定时设计方法,结合实例验证了在保证总时间资源不变情况下的系统优化设计方法。得出的结论对优化情报雷达工作模式设计、提升情报雷达战术性能具有指导意义。

关键词:反射身;情报雷达;系统优化;连续探测

中图分类号:TN959.1

文献标志码:A

文章编号:1004-7859(2020)04-0001-04

引用格式:朱新国. 情报雷达威力衔接问题研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(4): 1-4.

ZHU Xinguo. A Study on detection discontinuity for intelligence radar[J]. Modern Radar, 2020, 42(4): 1-4.

A Study on Detection Discontinuity for Intelligence Radar

ZHU Xinguo

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

Abstract: Considering the development trend of stealth target and more complicate electromagnetic environment, radar detection discontinuity caused by stealth target and active jamming is systematically elaborated in this paper. Detection discontinuity in middle-close range is easy to occur in switching between main beam and blind compensation beam under above mentioned two scenes, and the ultimate cause is unreasonable design of blind compensation beam. Then the timing design method of blind compensation beam for solving the problem of detection discontinuity is theoretically derivated, and the system optimization design method is verified by two examples, which guarantee no increasing in total time resources. The conclusion is of guiding significance for working mode performance improvement and tactical performance improvement of intelligent radar.

Key words: anti-stealth; intelligence radar; system optimization; continuous detection

0 引言

传统情报雷达主要用于对空中气动目标进行探测,包括战斗机、侦察机、轰炸机以及运输机等,获取其距离、方位、高度等坐标信息,并传送给作战指挥机构,支持拦截、打击等战术指挥决策^[1]。为获得不对称能力优势,美军一方面大力发展隐身技术,其 F-22 隐身战斗机、B-2 隐身轰炸机、RQ-170 隐身无人侦察机等雷达散射截面积(RCS)优于常规兵器 2~3 个数量级,已对现有防空体系造成严重冲击^[2];另一方面,美军正大力推进其下一代机载电子干扰机(NGJ)计划^[3],NGJ 将被建设成为一种近乎全频谱的干扰机,频段覆盖 30 MHz~40 GHz,将使未来情报雷达面临的电磁环境进一步复杂化。可以预见,情报雷达将面临目标隐身化和电磁环境日益复杂化的严峻挑战。

无论常规雷达还是反隐身雷达,都是针对一定 RCS 目标进行设计的,当遭遇更小 RCS 的目标时,必然带来探测不连续问题,尤其主波束和补盲波束发生

切换时,远距离支援干扰同样会使得探测不连续,当干扰功率谱密度增加时,主波束和补盲波束之间切换的威力漏隙会更大。基于这一问题,本文首先理论推导了隐身目标和远距离支援干扰引起的威力衔接问题,然后提出了一种不同 RCS、干扰功率谱密度条件下雷达参数设计优化方法。最后采用实例演示了雷达参数设计优化步骤,并验证了有效性。

1 隐身目标引起威力衔接问题

情报雷达一般威力方程^[4]为

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t \tau G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_s D_0 L_s} \right]^{1/4} \quad (1)$$

式中: P_t 为发射峰值功率; τ 为脉冲宽度; G_t 为发射天线增益; G_r 为接收天线增益; σ 为目标散射截面积; λ 为雷达工作波长; k 为玻耳兹曼常数; T_s 为系统噪声温度; D_0 为检测信噪比; L_s 为系统损耗。

情报雷达通过大的功率孔径积设计实现大威力。固态发射机因其高可靠、高效率等优势,并可在单元小峰值功率条件下通过大脉宽设计支持目标的尽远发

现,从而在相控阵雷达领域获得广泛应用,大脉宽调频信号已经成为雷达工作的一种基本信号形式。情报雷达一般采用大脉宽信号覆盖中远区,同时采用小脉宽信号给大脉宽信号补盲,大脉宽和小脉宽信号分别对应主波束和补盲波束。为讨论方便,假设某情报雷达设计针对 RCS 为 $\sigma_0 = 1 \text{ m}^2$ 气动目标,最大探测威力 $R_{\max} = 450 \text{ km}$,最小探测距离为 $R_{\min} = 5 \text{ km}$,发射机最大工作比 $\eta = 25\%$ 。

主波束需要用足工作比,即采用最大工作比确保对远区目标的搜索发现。最优脉宽可由最大工作比得出,即

$$\eta = \frac{\tau}{T} = \frac{\tau}{\tau + (T - \tau)} \quad (2)$$

图 1 为雷达工作定时示意图。不考虑半脉压处理,则 $T - \tau$ 为 450 km 对应的量程,即 3 ms 。根据上文假设,发射机最大工作比为 $\eta = 25\%$,则可得 $\tau_{\max} = 1000 \mu\text{s}$,而此脉宽对应距离盲区为 150 km ,必须采用一个更小脉宽的定时进行补盲。

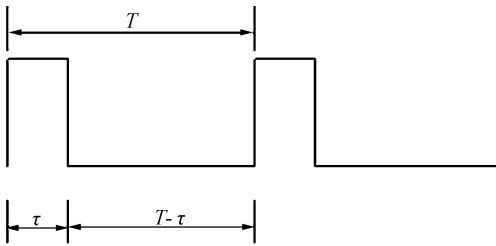


图 1 雷达工作定时示意图

由最小探测距离 $R_{\min} = 5 \text{ km}$ 可知,最小脉宽不宜超过 $33 \mu\text{s}$,取最小脉宽 $\tau_{\min} = 32 \mu\text{s}$ 。则其对应距离盲区仅为 4.8 km ,满足最小探测距离设计要求。考虑采用相同的积累脉冲数,在其他工作参数不变的条件下,若 τ_{\max} 对应威力为 $R_{\max} = 450 \text{ km}$,则 τ_{\min} 对应威力为

$$R_{32 \mu\text{s}} = R_{\max} \cdot 10^{\left[10 \lg \left(\frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \right) / 40\right]} \quad (3)$$

由式(3)可得, τ_{\min} 对应威力为 $R_{32 \mu\text{s}} = 190.3 \text{ km}$,而 τ_{\max} 盲区为 150 km 。因此, τ_{\min} 满足 τ_{\max} 补盲威力需求。

以上为针对 $\sigma_0 = 1 \text{ m}^2$ 条件下雷达工作参数设计过程,当 RCS 发生变化时,雷达威力会发生相应变化。 σ_0 、 σ' 对应的威力分别为

$$\begin{cases} R_{\max} = \left[\frac{R_t \tau G_t G_r \sigma_0 \lambda^2}{(4\pi)^3 k_s T_s D_0 L_s} \right]^{1/4} \\ R_{\max}' = \left[\frac{P_t \tau G_t G_r \sigma' \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_s D_0 L_s} \right]^{1/4} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得

$$R_{\max}' = R_{\max} \cdot \left[\frac{\sigma'}{\sigma_0} \right]^{1/4} \quad (5)$$

图 2 给出了不同 RCS 条件下 τ_{\max} 和 τ_{\min} 分别对应的威力曲线。由该曲线可知,当 RCS 大于 -4 dBm^2 ,即为 0.4 m^2 时, τ_{\min} 满足 τ_{\max} 补盲需求,当 RCS 小于 -4 dBm^2 时, τ_{\min} 不满足 τ_{\max} 补盲需求,由此发生距离衔接问题。例如,当 RCS 为 -10 dBm^2 ,即为 0.1 m^2 时, τ_{\max} 威力仅为 107 km , $107 \text{ km} \sim 150 \text{ km}$ 为威力漏隙。

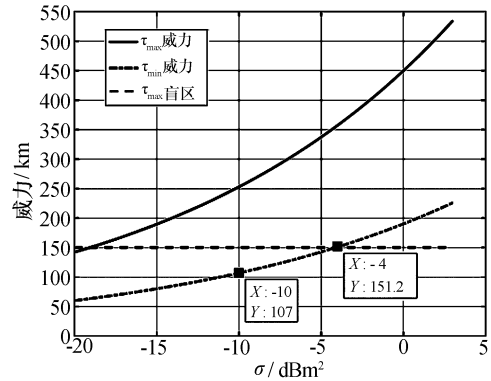


图 2 不同 RCS 条件下威力曲线

2 远距离支援干扰引起威力衔接问题

远距离支援干扰条件下雷达威力方程为^[5]

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t \tau G_t G_{sl} \sigma R_j^2}{4\pi (P_j/B_j) G_j D_0 L_s} \right]^{1/4} \quad (6)$$

式中: G_{sl} 为雷达接收天线在干扰机所在方位的增益,雷达采取副瓣对消^[6]所获得的信干比得益可一并计入 G_{sl} 中; R_j 为干扰机相对雷达距离, P_j/B_j 为干扰机输出的干扰功率谱密度; G_j 为干扰机天线增益。

假设干扰功率谱密度为 250 W/MHz ,即 $P_{j0}/B_{j0} = 250 \text{ W/MHz}$ 时雷达综合采取副瓣对消等反干扰措施后, $\tau_{\max} = 1000 \mu\text{s}$ 对应副瓣自卫距离为 $R_{\max} = 360 \text{ km}$,当干扰功率谱密度发生变化时,雷达副瓣自卫距离也会发生相应变化。 P_{j0}/B_{j0} 、 P_j'/B_j' 对应的副瓣自卫距离分别为

$$\begin{cases} R_{\max} = \left[\frac{P_t \tau G_t G_{sl} \sigma R_j^2}{4\pi (P_{j0}/B_{j0}) G_j D_0 L_s} \right]^{1/4} \\ R_{\max}' = \left[\frac{P_t \tau G_t G_{sl} \sigma R_j^2}{4\pi (P_j'/B_j') G_j D_0 L_s} \right]^{1/4} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可得

$$R_{\max}' = R_{\max} \cdot \left[\frac{P_{j0}/B_{j0}}{P_j'/B_j'} \right]^{1/4} \quad (8)$$

图 3 给出了不同干扰功率谱密度条件下 $\tau_{\max} = 1000 \mu\text{s}$ 和 $\tau_{\min} = 32 \mu\text{s}$ 分别对应的副瓣自卫距离曲

线。由该曲线可知,当干扰功率谱密度小于 260 W/MHz 时, τ_{\min} 满足 τ_{\max} 补盲需求,当干扰功率谱密度大于 260 W/MHz 时, τ_{\min} 不满足 τ_{\max} 补盲需求,由此发生距离衔接问题。例如,当干扰功率谱密度大于 1 000 W/MHz 时, τ_{\max} 威力仅为 107.7 km, 107.7 km ~ 150.0 km 为威力漏隙。

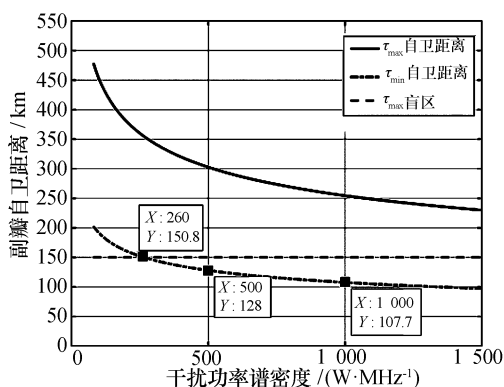


图3 不同干扰强度下副瓣自卫距离曲线

3 解决方案

3.1 隐身目标情况

假设在 σ_x 条件下采用 τ_x 对 τ_{\max} 盲区进行补盲,根据雷达威力方程

$$\begin{cases} R_{\max} = \left[\frac{P_t \tau_{\max} G_t G_r \sigma_0 \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_s D_0 L_s} \right]^{1/4} \\ R_{\tau_{\max} \text{盲区}} = \left[\frac{P_t \tau_x G_t G_r \sigma_x \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_s D_0 L_s} \right]^{1/4} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得

$$\tau_s = \tau_{\max} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma_s} \cdot \left(\frac{R_{\tau_{\max} \text{盲区}}}{R_{\max}} \right)^4 \quad (10)$$

式中: $\tau_{\max} = 1\,000\ \mu\text{s}$; $\sigma_0 = 1\ \text{m}^2$; $R_{\tau_{\max} \text{盲区}} = 150\ \text{km}$; $R_{\max} = 450\ \text{km}$ 。

图4给出了不同 RCS 条件下的最小补盲脉宽。由图可见,当 RCS 为 -4 dBm² 即 0.4 m² 时,补盲脉宽应不小于 31 μs ;当 RCS 为 -10 dBm² 即 0.1 m² 时,补盲脉宽应不小于 123.5 μs ;当 RCS 为 -13 dBm², 即为 0.05 m² 时,补盲脉宽应不小于 246.3 μs 。

从以上分析过程可得出隐身目标条件下的定时改进方法。假设改进前雷达采用 $\tau_{\max} = 1\,000\ \mu\text{s}$ 脉宽覆盖远区,脉冲数为4,周期为4 ms,同时采用 $\tau_{\min} = 32\ \mu\text{s}$ 脉宽进行补盲,脉冲数也为4,周期为1.1 ms。改进前定时参数如表1所示。为叙述方便计,先不考虑定时参差,不影响结论的一般性。

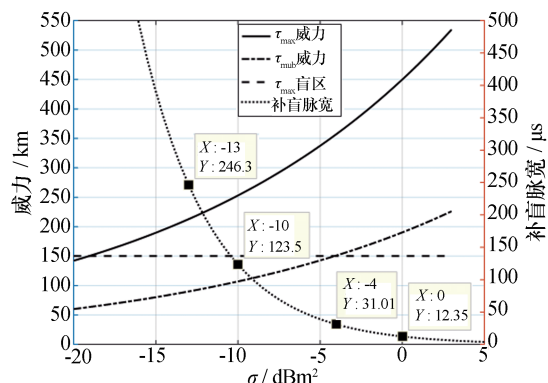


图4 不同 RCS 条件下最小补盲脉宽

表1 隐身目标条件下设计改进实例

项目	改进前		改进后		
	主波束	补盲波束	主波束	一级补盲	二级补盲
脉宽/ μs	16.000	32	1 000	200	16
周期/ms	4.000	1.100	4.000	1.225	0.240
脉冲数	4	4	4	3	3
波束时间/ms	16.000	4.400	16.000	3.675	0.720
总时间/ms	20.400		20.395		
1 m ² 威力/km	450	190	450	280	148
0.1 m ² 威力/km	253	107	253	157	83

改进前在 RCS 为 1 m² 条件下,可实现对目标 5 km ~ 450 km 连续探测。但当 RCS 减小到 0.1 m² 时,一方面,目标最远发现距离降低到 253 km,另一方面,107 km ~ 150 km 之间会出现威力漏隙,在此区域无法搜索发现目标。

为解决威力漏隙,必须在保证总时间资源不增加的条件下改进定时。如图4所示,0.1 m² 条件下补盲定时应大于 123.5 μs ,取 $\tau_{\max} = 200\ \mu\text{s}$,同时为保证总时间不增加故采用3脉冲,周期1.225 ms,在0.1 m² 条件下搜索发现距离为 157 km。而 τ_{\min} 本身又产生 30 km 盲区,可用 $\tau_{\min 2} = 16\ \mu\text{s}$ 进行补盲,周期和脉冲数分别选取 0.24 ms 和 3,该脉宽在0.1 m² 条件下最大威力达 83 km,满足二级补盲需求。如图5所示,定时改进后可满足 RCS 为 0.1 m² 隐身目标条件下对目标连续探测。

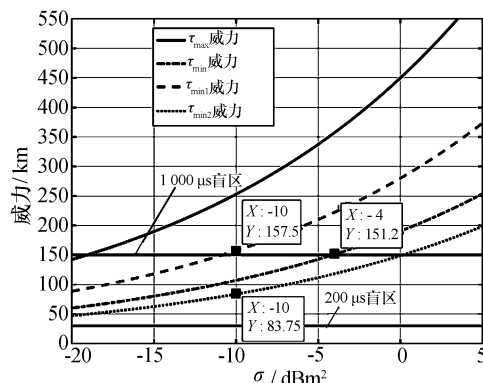


图5 设计改进后的威力曲线

3.2 远距离支援干扰情况

为解决远距离支援干扰下的威力衔接问题,假设在 P_{jx}/B_{jx} 条件下采用 τ_x 对 τ_{\max} 盲区进行补盲,根据远距离支援干扰条件下雷达威力方程

$$\begin{cases} R_{\max} = \left[\frac{P_t \tau_{\max} G_t G_{sl} \sigma R_j^2}{4\pi (P_{j0}/B_{j0}) G_j D_0 L_s} \right]^{1/4} \\ R_{\tau_{\max} \text{盲区}} = \left[\frac{P_t \tau_x G_t G_{sl} \sigma R_j^2}{4\pi (P_{jx}/B_{jx}) G_j D_0 L_s} \right]^{1/4} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可得

$$\tau_x = \tau_{\max} \cdot \frac{P_{jx}/B_{jx}}{P_{j0}/B_{j0}} \left(\frac{R_{\tau_{\max} \text{盲区}}}{R_{\max}} \right)^4 \quad (12)$$

式中: $\tau_{\max} = 1\,000\,\mu\text{s}$; $P_{j0}/B_{j0} = 250\,\text{W/MHz}$; $R_{\tau_{\max} \text{盲区}} = 150\,\text{km}$; $R_{\max} = 360\,\text{km}$ 。

图6给出了不同干扰强度下的最小补盲脉宽。当干扰功率谱密度为 $250\,\text{W/MHz}$ 时,补盲脉宽应不小于 $30.14\,\mu\text{s}$; 干扰功率谱密度为 $500\,\text{W/MHz}$ 时,补盲脉宽不小于 $60.28\,\mu\text{s}$; 干扰功率谱密度为 $1\,000\,\text{W/MHz}$ 时,补盲脉宽应不小于 $120.6\,\mu\text{s}$ 。

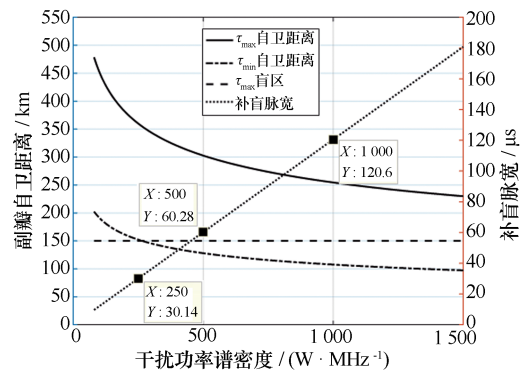


图6 不同干扰强度下最小补盲脉宽

从以上分析过程可得出强支援干扰条件下的定时改进方法。改进前的定时同表1,改进前在干扰功率谱密度 $250\,\text{W/MHz}$ 下,可实现对目标 $5\,\text{km} \sim 360\,\text{km}$ 连续探测。但当干扰增加到 $1\,000\,\text{W/MHz}$ 时,一方面,目标最远发现距离被压制到 $254\,\text{km}$,另一方面, $107\,\text{km} \sim 150\,\text{km}$ 间会出现威力漏隙,在此区域无法搜索发现目标,如表2所示。

表2 强干扰条件下定时改进实例

项目	改进前		改进后		
	主波束	补盲波束	主波束	一级补盲	二级补盲
脉宽/ μs	1 000	32	1 000	200	16
周期/ ms	4.000	1.100	4.000	1.225	0.240
脉冲数	4	4	4	3	3
波束时间/ ms	16.000	4.400	16.000	3.675	0.720
总时间/ ms	20.400		20.395		
250 W/MHz 威力/ km	360	152	360	224	119
1 000 W/MHz 威力/ km	254	107	254	158	84

为解决威力漏隙,同样必须在保证总时间资源不增加的条件下改进定时。如图6所示, $1\,000\,\text{W/MHz}$ 条件下补盲定时应大于 $120.6\,\mu\text{s}$,取 $\tau_{\min1} = 200\,\mu\text{s}$,同时为保证总时间不增加故采用3脉冲,周期 $1.225\,\text{ms}$,在 $1\,000\,\text{W/MHz}$ 条件下副瓣自卫距离为 $158\,\text{km}$ 。而 $\tau_{\min1}$ 本身又产生 $30\,\text{km}$ 盲区,可用 $\tau_{\min2} = 16\,\mu\text{s}$ 进行补盲,周期和脉冲数分别选取 $0.24\,\text{ms}$ 和3,该脉宽在 $1\,000\,\text{W/MHz}$ 条件下副瓣自卫距离达 $84\,\text{km}$,满足二级补盲需求。如图7所示,定时改进后可满足干扰功率谱密度 $1\,200\,\text{W/MHz}$ 条件下对目标连续探测。

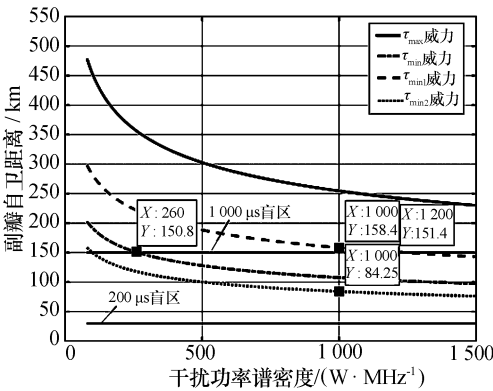


图7 设计改进后的副瓣自卫距离

以上讨论了远距离支援干扰引起的威力衔接问题,所得结论适用于一般的副瓣噪声式干扰环境,对情报雷达集能工作模式设计具有一定的指导意义。

4 结束语

当探测比设计指标更小的目标或遭遇比设计指标更强的副瓣噪声干扰时,情报雷达易出现探测不连续问题。远区由于信号本身较弱,不连续问题可以接受。但主波束和补盲波束切换时,由于系统设计不当带来威力无法衔接,从而造成中近区目标探测不连续,这是不可接受的。深层次原因是设计之初对目标隐身化发展和雷达电子战博弈认识的不足。本文首先给出了隐身目标和远距离支援干扰引起威力衔接问题的分析过程,指出近区探测不连续主要由补盲设计不合理引起。然后理论推导了两种场景下为避免威力衔接问题补盲脉宽优化设计方法,并结合实例给出了在保证总时间资源不变情况下系统优化设计方法。论文结论对优化情报雷达工作模式设计、提升现役情报雷达战术性能具有指导意义。

参考文献

[1] 郦能敬,王被德,沈 齐,等. 对空情报雷达总体论证: 理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社,2008.
LI Nengjing, WANG Beide, SHEN Qi, et al. Air surveillance radar system anlysis: principle and practice[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2008.

(下转第27页)

- Fusion. Salamanca, Spain: IEEE Press, 2014: 1-7.
- [17] SUN W, WEI P, GAO L, et al. Particle filtering based track-before-detect with sensor registration in single frequency network[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, Spain: IEEE Press, 2018: 2821-2824.
- [18] MELITA H, HANNAH M, ERIC LEFEBVRE. Track-before detect methods in tracking low-observable targets: a survey[J]. Sensors & Transducers, 2005(4): 374-380.
- [19] MS A, MASKELL S, GORDON N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/nonGaussian Bayesian tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002(50): 174-188.
- [20] LI T, BOLIC M, DJURIC P M. Resampling methods for particle filtering: classification, implementation, and strategies[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2015, 32(3): 70-86.

鲍志超 男,1991年生,博士研究生。研究方向为雷达数据处理。

姜秋喜 男,1960年生,教授,研究方向为雷达及雷达对抗。

刘方正 男,1983年生,讲师。研究方向为雷达信号处理。

陈秋菊 女,1982年生,讲师。研究方向为雷达信号处理。

(上接第4页)

- [2] ALVES M A, PORT R J, REZENDE C. Simulations of the radar cross section of a stealth aircraft[C]//2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2007). Brazil: IEEE Press, 2007: 409-412.
- [3] Next Generation Jammer: DOD should continue to assess potential duplication and overlap as program moves forward[R]. PB2013110059; Washington D C: Government Accountability Office, 2013.
- [4] MAHAFAZA B R. Radar system analysis and design using MATLAB[M]. 2nd ed. [S.l.]: Chapman & Hall/CRC, 2005.
- [5] 陈淦涛, 许稼, 高效, 等. 有源压制干扰下雷达探测距离分析与计算[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(1):

13-17.

CHEN Gantao, XU Jia, GAO Xiao, et al. Analysis and calculation of radar detection range with active blanket jamming[J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(1): 13-17.

- [6] LIU W. Subband adaptive generalized sidelobe canceller for broadband beam forming[C]// 11th IEEE Statistical Signal Processing Workshop. Singapore: World Scientific, 2001: 591-594.

朱新国 男,1981年生,博士,研究员级高级工程师。研究方向为雷达系统工程设计、雷达信号处理。曾获国防科技进步一等奖1项。

(上接第20页)

- [20] JIN T, QIU X, HU D, et al. Estimation accuracy and cramer-rao lower bounds for errors in multichannel HRWS SAR systems[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 99: 1-5.
- [21] GEBERT N, ALMEIDA F Q D, KRIEGER G. Airborne demonstration of multichannel SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 963-967.
- [22] FENG J, GAO C, ZHANG Y, et al. Phase mismatch calibration of the multichannel SAR based on azimuth cross correlation[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(4): 903-907.
- [23] CUMMING I, WONG F, et al. 合成孔径雷达成像: 算法

与实现[M]. 洪文, 胡东辉, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012: 20-20.

CUMMING I, WONG F, et al. Digital processing of synthetic aperture radar data algorithms and implementation[M]. HONG Wen, HU Donghui, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 20-20.

侯冰倩 女,1996年生,硕士研究生。研究方向为方位多通道雷达系统通道误差校正。

宋红军 男,1968年生,研究员。研究方向为 SAR 系统仿真、成像新体制研究、信号处理。