

文章编号: 2095-4980(2019)02-0216-05

## 基于 L 波段导航信号无源雷达探测

王 珏, 高 博, 李英军

(西安导航技术研究所, 陕西 西安 710071)

**摘 要:** 针对频繁的抵近电子侦察和隐身突防力量的威胁, 开展基于 L 波段导航信号的无源雷达探测技术的研究。其优势在于, 无源雷达探测系统具有良好的四抗性能。通过信号特性分析, 验证了基于 L 波段导航信号进行无源探测的可行性。利用几何稀释度(GDOP)对三坐标定位精确度进行分析, 仿真实验和理论分析验证了所提技术的可行性。

**关键词:** L 波段导航信号; 无源雷达; 几何稀释度; 三坐标探测

**中图分类号:** TN95

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201902.0216

## Target detection based on L-band navigation signal for passive radar

WANG Jue, GAO Bo, LI Yingjun

(Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**Abstraction:** Aiming at the threatening of the electronic reconnaissance and the attacking of the stealth target, the technique of the target detection based on L-band navigation signal is developed for passive radar. Passive radar has advantages over traditional radar on anti-stealth, survivability, anti-jamming capability, etc. The feasibility of the target detection is verified by analyzing the characteristics of the signal. The positioning accuracy of the 3D coordinate for the passive radar is analyzed based on Geometric Dilution Of Precision(GDOP). Theoretical analysis and simulation results validate the proposed technique.

**Keywords:** L-band navigation signal; passive radar; Geometric Dilution Of Precision; 3D coordinate detection

近年来, 外军电子侦察机频繁抵近我国重要地区进行电磁信号情报侦察活动。我国主战防空预警雷达为不暴露己方信号, 只能关机, 由老式雷达接替监视任务。无源雷达本身并不发射信号, 因此具有极强的隐蔽性, 可以突前部署、广泛布站, 形成具有较大纵深的探测预警范围<sup>[1-6]</sup>。

随着周边国家部署的隐身飞机逐渐增多, 作战环境日趋复杂, 严重威胁着我国雷达系统的生存及其效能的正常发挥。无源雷达采用 L 波段导航信号和双基体制, 通过观测目标的侧向散射回波可有效增大目标的雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS), 被视为探测隐身目标的一种有效手段, 对于未来战争中的敌情掌握具有至关重要的作用<sup>[7-10]</sup>。与常规的地波外辐射源(如调频(Frequency Modulation, FM)电台信号, 地面数字电视广播(Digital Video Broadcasting-Terrestrial, DVB-T)信号以及模拟电视信号等)相比, L 波段导航基站的发射信号具有对空导航的能力, 即在高空也具有较大的发射增益, 有利于无源雷达对中空目标的探测, 可形成对感兴趣目标的三坐标探测能力, 对于国土防空的早期预警探测具有重要意义。而且, 基于 L 波段导航信号的外辐射源雷达系统的研制可形成导航探测一体化的多功能系统, 符合雷达探测发展的前沿趋势。

此外, 巡航导弹等低空突防武器在近几年局部战争中被广泛利用, 直接威胁重点地区防御。受地球曲率影响, 传统单基雷达在低空存在盲区, 而受脉冲体制影响, 在近距离也存在探测盲区, 因此其抗低空突防能力较弱。无源雷达是双基体制, 可突前部署, 在低空区域可以获得更远的探测距离, 同时在近距离也不存在探测盲区, 因此在对抗低空突防武器时有较好的表现, 可作为重点地区防御的预警探测网进行部署<sup>[11-15]</sup>。

为了实现隐蔽探测, 先敌攻击, 被动无源探测技术是重点发展的手段。美国洛克希德·马丁公司用时 15 年设计并制造的第一代“沉默哨兵”系统是世界上最早投入商用的多基地无源雷达系统。该系统早期通过观测飞行目

收稿日期: 2018-08-16; 修回日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61401526)

标(如直升机、弹道导弹、旋翼飞机等)反射至少 3 个 FM 电台信号的回波与各自对应直射波之间的到达时间差,完成目标的交叉定位与跟踪。后期在其工作波段中又补充了模拟电视信号。这种无源相干探测雷达利用商业调频无线电台和电视台发射的 50~110 MHz 连续波信号,检测、跟踪、监视区内的运动目标。试验证明,利用 FM 辐射源信号,该系统可对 100 km 外雷达反射面积 10 m<sup>2</sup> 的目标进行跟踪。系统改进后可综合利用 FM、DVB-T、模拟电视信号等辐射源,跟踪目标数量可达 200 个,分辨间隔最高可达 15 m。

### 1 探测性能分析

#### 1.1 信号特性分析

对 L 波段导航信号的特性进行分析。系统分辨力可以通过模糊函数进行定量分析,系统模糊函数的数学表达式可以表示为:

$$\chi(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t-\tau)e^{j2\pi f_d t} dt \tag{1}$$

式中  $\tau, f_d$  分别表示目标时延、多普勒频率。系统的模糊函数可表示系统对观测场景中 2 个相近邻目标的分辨能力。

L 波段地面导航信标台以 15 Hz 和 135 Hz 复合调制的旋转场向空中发射脉冲,形成 15 Hz 和 135 Hz 脉冲包络调制信号,这些信号包含指北基准群脉冲(又称主基准群)、辅助基准群脉冲、台站识别脉冲、距离应答脉冲和随机填充脉冲。其中, L 波段导航信号脉冲包络调制信号的数学表达式为:

$$x(t) = 1 + m_1 \sin(2\pi f_1 t - \theta) + m_2 \sin(2\pi f_2 t - \varphi) \tag{2}$$

式中:  $f_1=15$  Hz;  $f_2=135$  Hz;  $m_1, m_2$  分别为 15 Hz 和 135 Hz 正弦包络信号的调制度;  $\theta$  和  $\varphi$  分别为 15 Hz 和 135 Hz 正弦包络信号的初相。L 波段导航信号辐射源功率较大,覆盖范围较广。图 1 给出 L 波段导航信号的模糊函数及其两维剖面图,可以发现,信号的相干性较小,在模糊函数的两维方向上均没有可以和主瓣相比的高副瓣,模糊函数是较为理想的图钉状形式,因而具有较好的两维分辨能力,适合作为无源雷达系统的照射源信号。

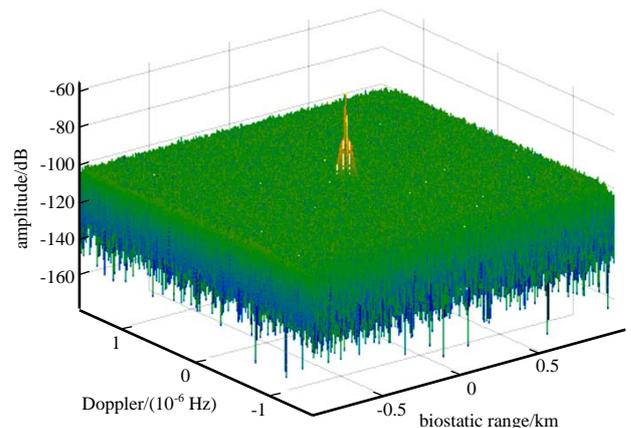


Fig.1 Ambiguity function of L-band navigation signal  
图 1 L 波段导航信号的模糊函数图

#### 1.2 探测威力分析

基于 L 波段导航照射源的无源雷达属于双基地雷达的一种,因此其关注的探测距离包括等效单基地距离以及接收机-目标距离 2 种。当只考虑噪声影响时,双基地雷达在自由的等效单基地探测距离由式(3)给出:

$$\sqrt{R_T R_{R_{max}}} = \left( \frac{P_t G_t G_r \delta \lambda^2}{(4\pi)^3 (KT_0 B_0 F) D_0 L} G_s \right)^{\frac{1}{4}} \tag{3}$$

自由空间的接收机-目标探测距离由式(4)给出:

$$R_{R_{max}} = \left( \frac{P_t G_t G_r \delta \lambda^2}{(4\pi)^3 (KT_0 B_0 F) D_0 L R_T^2} G_s \right)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中:  $\sqrt{R_T R_{R_{max}}}$  表示最大等效单基地探测距离,  $R_{R_{max}}$  为接收机-目标最大探测距离,  $R_T$  为目标与发射站的距离;  $P_t$  表示发射功率;  $G_t$  表示发射天线增益;  $G_r$  表示接收天线增益;  $\delta$  表示目标的双基 RCS;  $\lambda$  表示信号波长;  $K$  表示玻尔兹曼常数;  $T_0$  表示噪声温度;  $B_0$  表示噪声带宽;  $F$  表示声系数;  $D_0$  表示检测系数;  $L$  表示系统总的损耗<sup>[16]</sup>;  $G_s = BT$  表示雷达相干积累增益,  $B$  为信号的有效带宽, 取为 400 kHz(以 L 波段导航信号为例),  $T$  为相干积累时间。由于导航信号的占空比一般较高,目标反射信号很弱,故根据需要进行长时间积累来增强目标回波能量。这里只考虑基于导航信号的无源雷达在自由空间的等效单基地探测距离。根据前面的威力估算公式,当只考虑噪声影响时,设接收机的灵敏度为 12 dB(即接收机可接收到的目标回波信号的最小强度),则

表 1 系统参数

Table1 System parameters	
system parameter	typical value
Boltzmann constant	1.38×10 <sup>-23</sup>
system noise temperature/K	290
system loss/dB	7
gain of the transmitter/W	200/500
carrier frequency/GHz	1
Radar-Cross Section/m <sup>2</sup>	2
identification coefficient of the system/dB	7.6
signal bandwidth/kHz	400

回波信号最小可检测信号功率  $KT_0B_0F(S_0/N_0) = -85.62$  dBm。表1是仿真L波段导航信号探测威力时一些典型参数。

利用卡西尼线计算无源雷达在上述仿真条件下的探测范围,可得到基于L波段导航信号无源雷达系统针对于  $RCS=2$  m<sup>2</sup> 的隐身目标,在辐射源功率为200 W时,系统的最大可探测距离为57.69 km。

值得说明的是,受光学巴比涅原理影响,随着双基地角逐渐增大,目标散射截面积呈谐振式增加,当双基地角接近180°时,目标进入雷达的前向散射区域,在该区域,系统可观测到的目标散射截面积较单基地雷达增大很多。当双基地角达到180°时,达到前向散射效应,此时目标的前向散射雷达截面积达到最大值,如式(5)所示:

$$\sigma_F = 4\pi A^2 / \lambda^2 \quad (5)$$

式中  $A$  为目标在入射方向上的截面积或投影面积。当对感兴趣的目標形成前向散射观测时,目标 RCS 可提升 20~30 dB。一般可分为3种边射几何配置:a) 双基地角小于20°为准单基地区;b) 双基地角在20°~140°之间,目标随观测角整体上呈谐振式增加;c) 双基地角大于140°为目标的前向散射区,目标的散射截面积剧增,前向散射波瓣近似为 sinc 函数形式。对于多站联合组网监视的重点区域,当隐身目标穿越纵深预警网络时,可形成对目标的近似前向散射观测,使其 RCS 急剧增加。图2为重点区域利用基于L波段导航信号的无源雷达组网对隐身目标的探测示意图。辐射源与接收站2组成的无源雷达系统可对隐身目标形成近似前向散射,有效增大了接收站接收到的目标回波信号的能量。随着前向散射效应的增强,系统的最大可探测距离增加,可满足所需的系统探测距离。

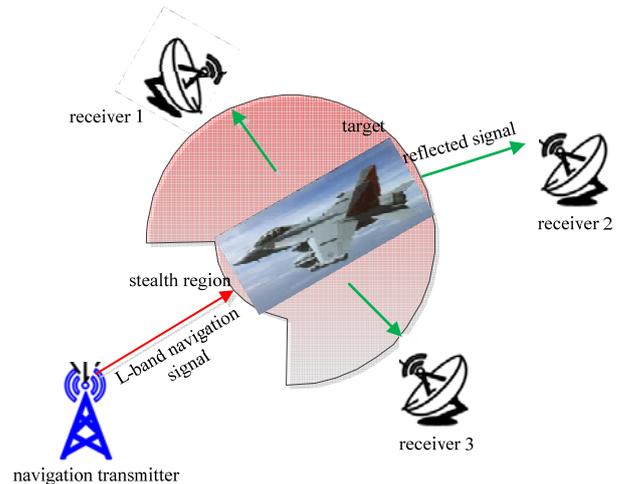


Fig.2 Ability of anti-stealth for passive radar  
图2 无源雷达反隐身目标示意图

### 1.3 定位精确度分析

在辐射源附近部署接收站可形成众多双基地无源雷达系统对较大感兴趣的重点区域进行监视。单发单收条件下,需要利用目标的波达方向(Direction Of Arrival, DOA)联合时差定位实现对目标的位置解算。受波束宽度影响,系统的测角精确度不是很高。因而在单站条件下,无法对目标实现较为精确的定位。对于感兴趣的重点观测区域,可通过在辐射源附近部署若干接收站进行联合组网探测,通过多站观测信息的交叉解算实现对目标的定位。典型的定位方法主要包括椭圆交叉定位和双曲线交叉定位等。本文采用基于到达角的测向定位方法,并采用三收一发的系统构型对感兴趣目标进行定位。侧向定位方法的示意图如图3所示,在外辐射源雷达中,方位角的测量可以通过比幅测角方法获得。在方位角测量的基础上,根据图3所示的几何关系,容易得到

$$d_1 = d \sin \varphi_1 \quad (6)$$

$$l_2 = d_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) = d \sin \varphi_1 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7)$$

由图3所示的测向定位几何方法,目标在  $X, Y$  两维的定位坐标可表示为:

$$\begin{cases} x = l_2 \cos \varphi_2 \\ y = l_2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (8)$$

其他维度也可通过类似的定位方法对目标位置进行解算。在多站定位条件下,很容易出现多个观测方位角所形成的方位线无法相交于一点的情况。多站情况下方位向一般会围绕真实目标点周围形成一个或多个三角形,可将三角形的质心作为目标的估计位置。对于多个三角形的情况,可将多个三角形质心的平均值作为目标的估计位置。

目标的空间定位受各因素如站址误差、测角误差、测距误差以及时间同步误差等影响,交叉定位算法对目标的各维度定位会存在相应的定位误差,而且同一系统对相同目标的定位精确度在不同位置也不相同。几何稀释度(GDOP)可用来评估系统的定位精确度。在三坐标定位时, GDOP 可用来描述定位误差的三维几何分布,且 GDOP 值越大,目标的三维定位精确度越差。系统的 GDOP 表示式为:

$$GDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (9)$$

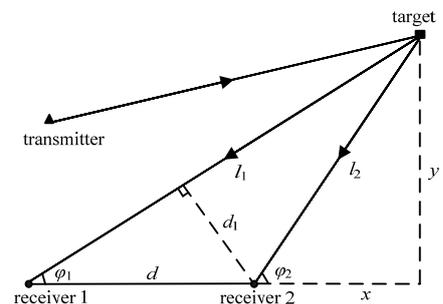


Fig.3 Geometry of the system for target location  
图3 定位几何构型示意

式中  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别表示目标在三维坐标  $X, Y, Z$  上的定位标准差。本文以 GDOP 描述系统三维坐标的定位精确度。图 4 是 3 个接收站均匀布站条件下(辐射源位置定为坐标原点), 随目标平台高度定位精确度的变化情况。图 4 以 L 波段导航信号为例, 站址测量误差为 20 m, 测距精确度为 30 m, 距离、方位变化范围为  $[-100 \text{ km}, 100 \text{ km}]$ , 高度变化范围为  $[1 \text{ km}, 10 \text{ km}]$ ;

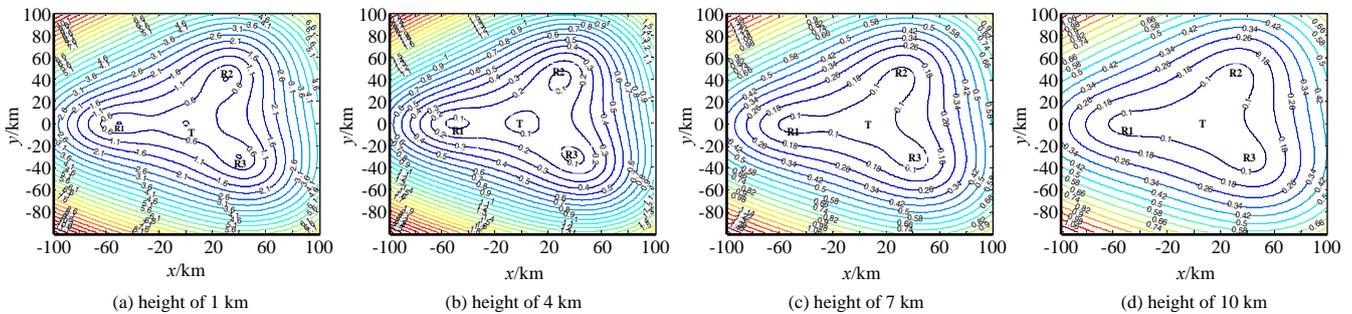


Fig.4 Variation of the positioning accuracy in  $x-y$  plane with the target height  
图 4 随高度变化  $x-y$  平面的定位精确度

容易发现, 在均匀布站条件下, 随着观测平面的升高, 系统在  $x-y$  平面的定位精确度也逐渐提高。在平台高度为 1 km, 4 km, 7 km 和 10 km 时, 系统在距离辐射源 100 km 处的定位精确度分别可达 3.10 km, 0.70 km, 0.42 km 和 0.34 km。随着方位距离的变化, 俯仰维观测的定位精确度如图 5 所示。可以发现, 在方位维靠近接收站或辐射基站的过程中, 俯仰维的定位精确度逐渐提升, 远离时定位精确度逐渐降低。此外, 还可通过接收站的灵活部署, 改变监视区域, 从而改善重点监视区域的定位精确度。

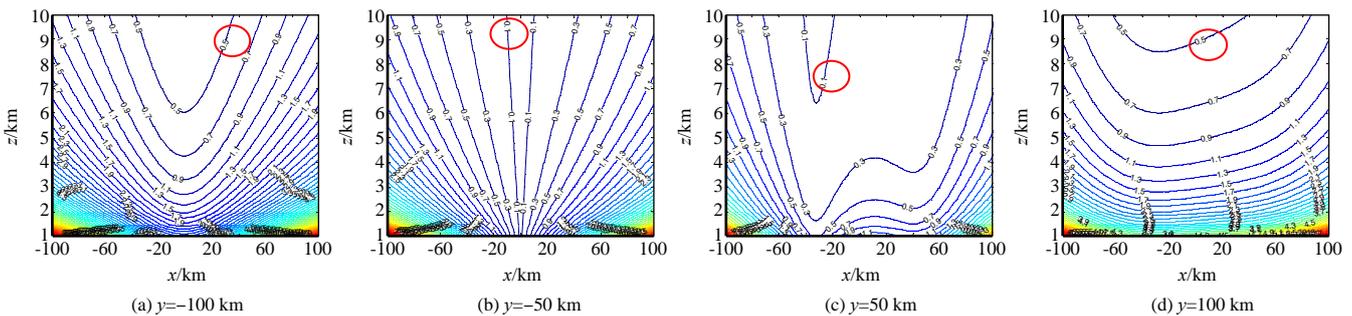


Fig.5 Variation of the positioning accuracy in  $x-z$  plane with the azimuth  
图 5 随方位距离变化  $x-z$  平面定位精确度分析

### 1.4 抗干扰能力分析

为了增强干扰效果, 干扰机总是以主波束对雷达实施干扰, 雷达通常以天线主波束指向目标。因此对单基地雷达的干扰通常有 2 种方式: a) 自卫式干扰, 干扰机与目标在一起, 干扰机天线主瓣对雷达天线主瓣实施干扰; b) 支援式干扰, 干扰机与目标分离, 干扰机天线主瓣通过雷达天线副瓣实施干扰。在无源双基雷达系统下, 敌方无法对系统的辐射源信号进行有效侦察, 也无法对静默工作的接收机进行侦察。因此敌方只能通过瞄准我方设备的照射源信号实施干扰, 干扰机天线的副瓣对无源雷达接收天线的主瓣进行干扰, 如图 6(a)所示。或是干扰机的副瓣对无源雷达接收天线的副瓣进行干扰, 如图 6(b)所示。只有极少数情况下, 当目标和干扰机一起处在无源双基地雷达的基线延长线上时, 才能发生干扰机主瓣对无源双基雷达接收机主瓣的干扰。因此, 相较于传统单基地雷达, 基于导航信号的无源双基雷达的抗干扰能力更强。

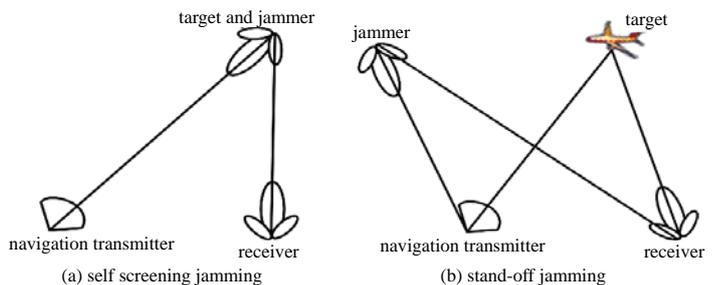


Fig.6 Geometry of the jammer and the passive radar system  
图 6 干扰机与无源雷达系统几何关系

## 2 结论

本文开展了基于 L 波段导航信号的无源雷达探测技术的研究。分析了 L 波段导航信号的特性, 在此基础上对

系统的模糊函数进行了理论分析和仿真验证,说明利用 L 波段导航信号开展无源雷达探测技术研究的可行性。进一步地,利用双基地雷达方程对系统的探测威力进行了分析,在无源雷达组网探测条件下,还可通过前向散射效应对隐身目标进行有效探测。最后,对系统的抗干扰能力进行了分析,可以发现基于 L 波段导航信号开展无源雷达探测技术、多站组网协同定位技术的研究,可以有效构建雷达一体化探测系统,为解决隐身目标探测、低空盲区探测、抗干扰及三坐标探测问题提供新思路。

#### 参考文献:

- [ 1 ] PALMER J E,HARMS H A,SEARLE S J,et al. DVB-T passive radar signal processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013,61(8):2116–2126.
- [ 2 ] LI H W,WANG J. Particle filter for maneuvering target tracking via passive radar measurements with glint noise[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2012,6(3):180–189.
- [ 3 ] 王海涛,王俊. 基于压缩感知的无源雷达超分辨 DOA 估计[J]. 电子与信息学报, 2013,35(4):877–881. (WANG Haitao, WANG Jun. Super-resolution DOA estimation in passive radar based on compressed sensing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013,35(4):877–881.)
- [ 4 ] DENG Yaqi,WANG Jun,WANG Jue,et al. Cascaded interference suppression method based on sparse representation for airborne passive radar[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2018,12(1):104–111.
- [ 5 ] WANG J,WANG J. Joint compressed sensing imaging and phase adjustment via an iterative method for multistatic passive radar[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2018,19(4):557–568.
- [ 6 ] WANG J,WANG J,WU Y,et al. Phase adjustment for multistatic passive radar imaging based on image entropy and image contrast[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016,37(18):4460–4485.
- [ 7 ] 郭福成. 基于 TOA 和 DOA 的固定单站无源雷达跟踪方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):908–912. (GUO Fucheng. Tracking algorithm of fixed mono-station passive radar using TOA and DOA[J]. Journal of Terahertz Science & Electronic Information Technology, 2015,13(6):908–912.)
- [ 8 ] LI W,TAN B,PIECHOCKI R. Passive radar for opportunistic monitoring in e-health applications[J]. IEEE Journal of Translational Engineering in Health & Medicine, 2018(6):2800210.
- [ 9 ] GOGINENI S,SETLUR P,RANGASWAMY M,et al. Passive radar detection with noisy reference channel using principal subspace similarity[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2018,54(1):18–36.
- [ 10 ] BERTHILLOT C,SANTORI A,RABASTE O,et al. BEM reference signal estimation for an airborne passive radar antenna array[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2017,53(6):2833–2845.
- [ 11 ] BAI Xia,HAN Jiatong,ZHAO Juan. Sparse-based disturbance cancellation approach for passive radar[C]// 2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference. Kuala Lumpur,Malaysia:IEEE, 2018:432–436.
- [ 12 ] YONEL B,MASON E,YAZICI B. Deep learning for passive synthetic aperture radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2018,12(1):90–103.
- [ 13 ] YI Jianxin,WAN Xianrong,LI Deshi,et al. Robust clutter rejection in passive radar via generalized subband cancellation[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2018,54(4):1931–1946.
- [ 14 ] ZHAO Yongsheng,ZHAO Yongjun,ZHAO Chuang. Joint delay-Doppler estimation for passive bistatic radar with direct-path interference using MCMC method[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2018,12(1):130–136.
- [ 15 ] CHEN G,WANG J,GUO S,et al. Improved mismatched filtering for ATV-based passive bistatic radar[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2018,12(6):663–670.
- [ 16 ] SKOLNIK M. Radar handbook[M]. 3rd ed. New York:McGraw-Hill, 2008.

#### 作者简介:



王 珏(1989–),男,山西省长治市人,博士,助理研究员,主要研究方向为外辐射源雷达系统设计、雷达目标检测.email:xdwangjue@163.com.

高 博(1986–),男,西安市人,工程师,主要研究方向为雷达总体设计.

李英军(1963–),女,西安市人,研究员,主要研究方向为雷达总体设计.