

文章编号: 2095-4980(2018)03-0452-06

非合作侦察定位系统的关键技术

朱拥建, 刘 远, 石林艳, 王 宏

(中国电子科技集团公司 第五十一研究所, 上海 201802)

摘 要: 基于雷达辐射源的非合作侦察定位系统因具有良好的“四抗”能力, 而成为电子战领域的研究热点; 但是非合作辐射源的时空频特征未知, 又给非合作侦察定位系统带来一系列亟需解决的技术问题。为此, 应用非合作侦察定位技术原理, 对辐射源侦察引导、系统时标提取、弱信号处理等关键技术进行了研究, 并在此基础上完成了工程样机的设计。最后, 通过外场试验的测试充分验证了非合作侦察定位技术在工程上的可实现性。

关键词: 非合作侦察定位; 外辐射源; 时标提取; 互相关处理

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0452

Key technology of non-cooperative reconnaissance and positioning system

ZHU Yongjian, LIU Yuan, SHI Linyan, WANG Hong

(The 51th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201802, China)

Abstract: Because of the good “four resistances” capabilities, non-cooperative reconnaissance and positioning systems based on radar emitters have become a research hotspot in the field of electronic warfare. Nevertheless, the characteristics of the space-time frequency of non-cooperative radiation sources are unknown, and then it brings a series of technical problems that need to be solved. Some key technologies such as radiation source reconnaissance guidance, system time-scale extraction and weak signal processing, are studied based on the principle of non-cooperative reconnaissance and positioning technology. The engineering prototype is completed as well. The engineering feasibility of non-cooperative reconnaissance positioning technology can be verified by the results of the field test.

Keywords: non-cooperative reconnaissance and location; external radiation source; extract time benchmarks; correlation process

随着智能化干扰技术、目标综合隐身技术、反辐射导弹的大量应用及超低空突防技术这“四大威胁”的不断发展^[1], 以雷达为核心的有源探测系统面临新一轮挑战^[2], 20世纪90年代发生的几场高科技战争充分说明了这一点。为对抗“四大威胁”, 在越来越强调电磁频谱争夺的趋势下, 研发具有“四抗”能力的无源侦察定位技术具有重要的战略意义^[3]。常规的无源侦察定位系统的主要目的是侦察、发现和定位辐射源信号, 存在侦察距离近以及对保持静默状态的目标无法实现有效探测和定位等缺点。因此, 有必要研究新体制的无源侦察定位技术, 以弥补现有无源侦察装备的不足。非合作侦察定位技术是区别于雷达和电子侦察的一种非常规侦察定位技术, 该技术通过对外辐射源进行有效侦察, 接收处理外辐射源照射空中目标的散射回波信号, 实现目标的侦察定位^[4]。采用非合作侦察定位技术的设备主要优点有: 1) 不辐射电磁信号, 敌方无法对其实施有效干扰和硬摧毁; 2) 接收的是目标的前向或侧向散射回波信号, 利于对付隐身目标; 3) 以大功率雷达作为外辐射源, 可实现对静默目标的侦察和定位; 4) 一般为单站形式, 设备量与多站时差定位、测角交叉体制的传统无源侦察定位设备相比低很多。

1 非合作侦察定位系统概述

非合作侦察定位系统通过接收处理其周围存在的外辐射源照射到其他空中目标的散射回波信号, 发现、定位

目标，进而实施跟踪的侦察定位系统。系统的构型和定位原理与传统双基地雷达类似^[5]，其核心差异主要体现在系统本身不主动辐射信号，也不需要配置大功率发射装置，可认为它仍是一种特殊的无源侦察系统。

根据非合作侦察定位系统所利用的外辐射源种类，非合作侦察定位系统^[6-7]主要分为两大类：第一类，利用第三方民用广播电视或商用通信信号的非合作侦察定位系统，这种外辐射源信号具有空间分布广、全天时工作等特点，系统的关键技术体现在连续波类型的直达波对消抑制和弱目标检测跟踪方面；第二类，利用其他大功率雷达辐射源信号的非合作侦察系统，这种外辐射源信号具有信号波形好，辐射功率强等特点，系统的关键技术集中在非合作体制下的时空频同步技术。本文论述的非合作侦察定位系统是第二类，原理框图如图 1 所示。

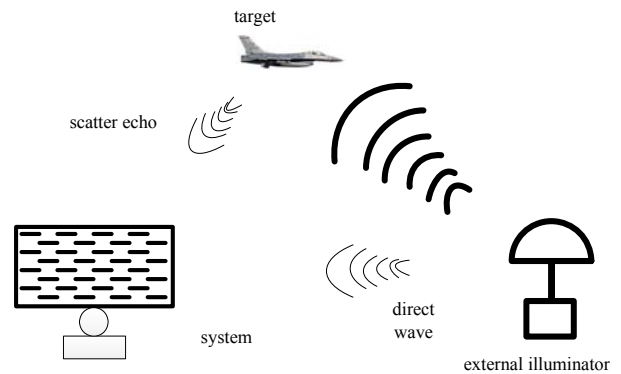


Fig.1 Diagram of non-cooperative reconnaissance positioning system
图 1 非合作侦察定位系统原理框图

1.1 定位模型

非合作侦察定位系统定位的几何平面模型如图 2 所示。当已知外辐射源与系统间的基线距离 R_L 、系统接收到目标散射回波的到达角 θ_R 、外辐射源到目标的距离 R_T 与系统到目标的距离 R_R 之和 R_S (即 $R_S = R_T + R_R$) 时，利用余弦定理就可以唯一地确定出目标位置^[8]。

$$R_T^2 = R_R^2 + R_L^2 - 2R_R R_L \cos \theta_R \quad (1)$$

$$R_R = \frac{R_S^2 - R_L^2}{2(R_S - R_L \cdot \cos \theta_R)} = \frac{R_L(1 - e^2)}{2e(1 - e \cdot \cos \theta_R)} \quad (2)$$

式中 $e = \frac{R_L}{R_T + R_R}$ 是以“系统”和“外辐射源”为焦点的椭圆的离心率。

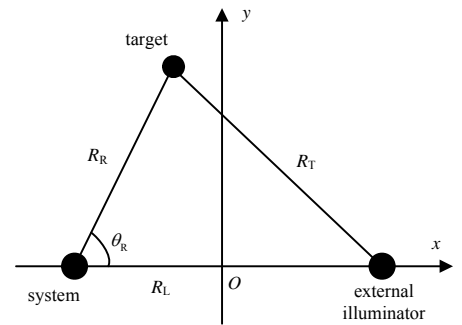


Fig.2 Geometric model of non-cooperative location
图 2 非合作定位几何模型

R_L 可由其经纬度信息算出； θ_R 可通过系统对散射目标的回波进行多波束比幅测出； R_S 是通过直达波和散射回波的时差信息进行互相关处理，并依据互相关函数的峰值计算出两者的时间差，进而得出距离差再算出。

1.2 系统关键技术

涉及到非合作侦察定位的关键技术有：

1) 外辐射源快速侦察引导技术。利用外辐射源进行非合作侦察定位，需要对外辐射源直达波信号进行快速处理分析，以引导多路接收机对散射回波信号进行同步接收、相关处理、定位等，再解算出目标的位置信息。因此，快速侦察引导是系统对目标进行有效侦察定位的基础。

2) 微弱目标检测技术。非合作侦察定位系统接收目标的散射回波信号，信号幅度小，尤其在对远距离小目标进行侦察定位时，回波信号常常淹没在噪声或杂波中，导致检测困难，这就需要微弱目标检测技术^[9]。

3) 数字多波束形成(Digital Beam Forming, DBF)技术。雷达辐射源天线主波束的照射方向决定了目标的探测空域。当非合作侦察定位系统接收散射回波时，就得考虑非合作方式下的空间同步问题，即如何控制接收天线波束与发射天线波束对准同一批目标。传统的双基地雷达系统通常采用脉冲追赶技术来实现收发双方的空间同步，而在非合作侦察定位系统中，由于外辐射源天线波束指向的不确定性，常用的波束追赶方法易受到限制^[10]。鉴于此，工程实施中可采取 DBF 技术，实现“窄发宽收”的非合作空间同步，其优点是系统校正方便，工作方式灵活，无同时多波束增益损失等^[11]。

2 关键技术的实现途径

2.1 外辐射源快速侦察引导技术

外辐射源快速侦察引导技术主要实现对所利用外辐射源的快速测量和频率引导、非合作时标提取以及相关处理的参考样本的存储。

1) 快速测量和频率引导

为确保非合作侦察定位系统与外辐射源系统的频率同步,系统需要精确测量出直达波信号的单脉冲频率。本文采用数字相位测量法,其原理实现如图 3 所示。

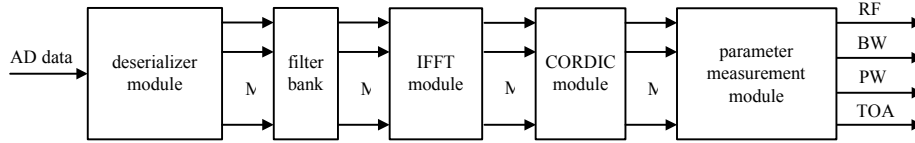


Fig.3 Block diagram of fast measurement and frequency guide
图 3 快速测量和频率引导的原理框图

直达波信号通过高速模数(Analog-to-Digital, AD)转换器采样后,在串并转换模块完成高速 AD 数据的多路分配与抽取,在并行滤波器组模块与并行逆快速傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)模块实现信道的划分与下变频^[12],生成同相正交(In-phase Quadrature, IQ)信号;IQ 信号采用坐标旋转数字计算机(Coordinate Rotation Digital Computer, CORDIC)方法可获得信号的瞬时幅度 $a(m)$ 和瞬时相位 $\varphi(m)$,再进入参数测量模块;通过比较信号的幅度值与一门限的大小,初步判断信号在哪个信道有输出,即粗测频;但是,当信号频率处于信道的交叠处时,简单地比较信道的输出幅度可能会出现误判,尤其是直达波信号的信噪比较低时,频率的误差往往是单个滤波器的带宽值,这在工程应用中是不容忽视的。于是,除了比较输出幅度,还需与相位比较联合判断,并结合解模糊算法,以得到正确的通道值,即精测频。

$$a(m) = \sqrt{[X_I(m)]^2 + [X_R(m)]^2} \quad (3)$$

$$\varphi(m) = \arctan \frac{X_I(m)}{X_R(m)} \quad (4)$$

采用数字相位测量法完成单脉冲的载频测量, $f(m)$ 的运算如下:

$$f(1) = [\varphi(m) - \varphi(m-1)] / (2\pi \cdot \Delta T) \quad (5)$$

$$f(2) = [\varphi(m) - \varphi(m-2)] / (2\pi \cdot 2\Delta T) \quad (6)$$

$$f(k) = [\varphi(m) - \varphi(m-k)] / (2\pi \cdot k\Delta T) \quad (7)$$

式中: k 的取值范围为 $k \leq (1/f)\Delta T$; ΔT 为采样间隔。

工程应用中,由于外辐射源信号的脉冲宽度较宽,侦察引导部分的 AD 采样率较高,可多次测量以提高测频精确度。对于线性调频信号,该测频方法可实现优于 0.3 MHz 的测频精确度。

2) 非合作时标提取

非合作侦察定位系统与外辐射源之间为非协作方式,终究无法像合作双基地系统的接收站那样获取准确的导前脉冲。非合作侦察定位系统采用直达波到达时间(Time Of Arrival, TOA)作为时间基准(时标),为确保该时标的精确度,系统利用直达波自相关算法来提高 TOA 测量精确度,其原理框图如图 4 所示。

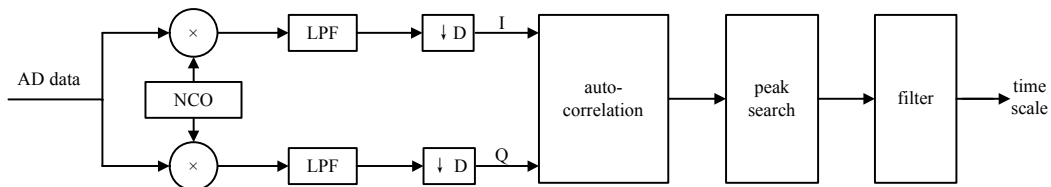


Fig.4 Block diagram of non-cooperative time standard extraction
图 4 非合作时标提取的原理框图

假设直达波信号变频后的中频参数如下:中心频率 180 MHz,带宽 5 MHz;中频信号又经过 AD 采样(采样率 240 MHz)后与数字振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)的正交信号混频,通过数字低通滤波生成 IQ 信号,再采用自相关处理模块对 IQ 信号进行自相关运算如下:

$$y(n) = \sum_{k=0}^T s(k) \cdot s^*(N+1-n+k) \quad (8)$$

式中: $s(k)$ 为直达波信号; $y(n)$ 为直达波信号自相关输出; T 为运算窗口。

上式运算可通过一个非递归式数字滤波器实现^[13]。最后,直达波经过自相关运算产生的相关信号的峰值,由最大值搜索模块进行检测并输出峰值出现的时刻(即时标)。

将自相关运算结果中的一个采样点 A 与相隔 64 个时钟周期的 16 个采样点的平均值 B 进行除法运算(由于 B 可能为零,为了防止除零运算,这里加一个常数 Q),得到一个商 $C = A / (B + Q)$ 。将 C 与一个预设的门限进行

比较, 如果 C 大于或等于门限则认为出现了外辐射源信号, 并触发最大值搜索过程, 搜索原理如图 5 所示, 具体流程如图 6 所示。为消除外界干扰信号对时间基准的影响, 在最大值(峰值)搜索后还可进行滤波处理。

2.2 微弱目标检测技术

由于非合作侦察定位系统与外辐射源信号的发射或接收都是不相参的^[14], 为实现系统对目标的微弱散射回波信号的检测, 采用互相关接收方式来提高系统的信噪比^[15]。

系统工作时, 首先接收到的是外辐射源直达波信号, 它通过混频、AD 采样后存储为互相关运算的参考信号。在散射回波接收处理部分, 可采用与直达波接收通道相同的本振信号将散射回波信号混频变成中频信号, 中频信号经 AD 转换为数字信号后, 与前面的参考信号进行互相关运算完成类似于雷达系统中的匹配滤波功能^[16-17]。显然, 直达波信号 $s_1(t)$ 和散射回波信号 $s_2(t)$ 都叠加了各自接收通道产生的内部噪声, 但两通道的内部噪声又是相互独立而不相关的; 对于进入两通道的外部噪声, 即使它们来自相同的噪声源, 因两通道接收外部噪声存在时间延迟, 两通道的外部噪声间也不具有明显的相关性。 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ (叠加了通道内部和外部噪声的)可表示为:

$$x_1(t) = s_1(t) + n_1(t) \tag{9}$$

$$x_2(t) = s_2(t - \tau) + n_2(t) \tag{10}$$

$x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 进行互相关运算后输出的互相关函数为:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = R_{s_1s_2}(\tau) + R_{s_1n_2}(\tau) + R_{s_2n_1}(\tau) + R_{n_1n_2}(\tau) \tag{11}$$

前文已假设各信号与噪声以及噪声之间的不相关性, 但在工程应用中, $R_{s_1n_2}(\tau)$, $R_{s_2n_1}(\tau)$ 和 $R_{n_1n_2}(\tau)$ 并不会为零, 而表现为剩余噪声。以脉宽为 15 μ s, 带宽为 5 MHz 的线性调频信号与不同信噪比的参考信号进行互相关运算, 所得仿真结果如表 1 所示。由表 1 可知, 与理想的雷达匹配滤波(增益为 18.75 dB)处理相比, 参考信号信噪比为 10 dB 时, 互相关接收处理的增益要差 1.25 dB。随着直达波存储波形信噪比的降低, 互相关接收处理的增益将进一步恶化。试验时, 以任意波形发生器产生上述仿真用的线性调频信号, 经放大后通过天线发射, 再采用雷达模拟器产生 400 Hz 的多普勒频偏信号作为散射回波信号, 该信号与系统接收的直达波信号进行互相关运算; 选取参考信号信噪比为 10 dB 时, 得到的互相关增益约有 1.6 dB 的损失, 从而证明了仿真与试验结果的一致性。

2.3 数字多波束形成技术

DBF 技术的基本原理是各通道数据与其对应的权值进行乘法累加, 其数学表达式为:

$$y[n] = \sum_{i=1}^N w_i(\theta) x_i[n] \tag{12}$$

式中: $y[n]$ 是 DBF 合成输出; w_i 是第 i 通道的权值; $x_i[n]$ 是第 i 通道的数据, 这些数据均为复数。 w_i 由幅度加权因子、校正系数和方向因子 3 项参数合成。幅度加权因子用来降低波束副瓣, 通常有汉明加权、汉宁加权、泰勒加权和切比雪夫加权; 校正系数用来校正多通道幅相误差; 方向因子调整接收波束指向, 让最大接收增益方向对准目标回波方向。

DBF 技术可形成多个高增益窄波束, 同时覆盖照射区域, 既保证系统的灵敏度和方位分辨力, 又可解决非合作空间同步问题。为了更好地实现 DBF 技术, 首先要精选电性能一致性好的材料、稳定加工工艺等措施以保障多通道接收机的高稳定和高一致性; 其次, 考虑到阵元方向图误差、阵元位置误差以及阵元互耦误差等误差随时间和环境的变化不大, 可采用有源校正方法, 即通过设置方向精确已知的校正信源对阵列扰动误差进行估计,

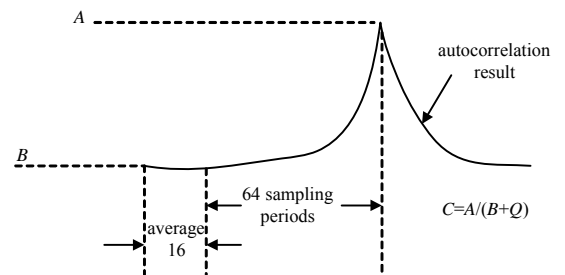


Fig.5 Block diagram of autocorrelation peak search
图 5 自相关峰值搜索原理框图

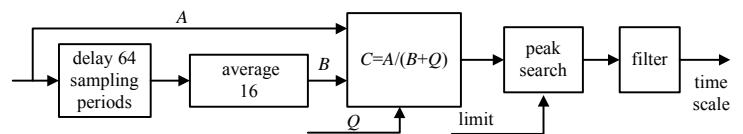


Fig.6 Flow chart of autocorrelation peak search
图 6 自相关峰值搜索流程图

表 1 互相关接收处理增益的仿真结果

Table2 Cross-correlation receive processing gain simulation results						
SNR of reference signal/dB	40	22	16	10	4	-2
correlation reception processing gain/dB	18.1	18.0	18.0	17.5	16.7	13.4

来实现对阵元误差的校正^[18]；另外，还需采用回路型校正方法进行机内校正，即由频率源产生校正信号经上变频形成载频段校正信号后，馈至接收前端完成对阵元接收通道的校正。

3 结论

介绍了基于不相关外辐射源的非合作侦察定位系统的组成原理，研究了实现该系统所用的关键技术并给出了相应的工程实现途径。采用自相关算法提取非合作系统时标比传统的时域包络前沿法具有更高的精确度和更好的稳定性，可将直达波脉冲丢失率控制在10%以内；在微弱目标检测环节，提升直达波参考信号的信噪比，可提升互相关运算的增益，将互相关运算的增益损失控制在2 dB以内，仿真和实测结果证明了算法的有效性和实用性。

作者所在课题组分别在“十一五”和“十二五”期间，突破了非合作侦察定位系统中的多项关键技术，完成了工程样机的研制；外场试验的测试结果也充分证明了非合作侦察定位技术的技术优势和可实现性。

参考文献：

- [1] 唐佳. 基于脉冲制非合作辐射源的无源定位技术研究及实现[D]. 成都:西南交通大学, 2007. (TANG Jia. Study and implementation of passive location technology based on pulse non-cooperative illumination[D]. Chengdu, Sichuan, China:Southwest Jiaotong University, 2007.)
- [2] 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 and Electronic Information Technology, 2015,13(6):908-912.)
- [3] 田波. 一体化电子战管理系统研究[J]. 航天电子对抗, 2014,30(2):59-61. (TIAN Bo. Research on integration electronic warfare management system[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2014,30(2):59-61.)
- [4] 杨建华. 雷达无源定位技术的发展与战术应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009,4(6):601-605. (YANG Jianhua. The latest development of radar passive localization technology and its applications[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009,4(6):601-605.)
- [5] 杨振起,张永顺,骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2001. (YANG Zhenqi,ZHANG Yongshun, LUO Yongjun. Dual(multi) base radar system[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2001.)
- [6] GRIFFITHS H D, LONG N R W. Television-based bistatic radar[J]. IEE Proceedings F-Communications, Radar and Signal Processing, 2008,133(7):649-657.
- [7] 饶云华,徐凯文,王胜涛,等. 采样定时偏差对无源雷达性能影响研究[J]. 雷达科学与技术, 2018,16(1):79-86. (RAO Yunhua,XU Kaiwen,WANG Shengtao,et al. Impact of sampling timing offset on passive radar performance[J]. Radar Science and Technology, 2018,16(1):79-86.)
- [8] 宋杰,何友,蔡复青,等. 基于非合作雷达辐射源的无源雷达技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2009,31(9):2151-2154. (SONG Jie,HE You,CAI Fuqing,et al. Overview of passive radar technology based on non-cooperative radar illuminator[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009,31(9):2151-2154.)
- [9] 李硕. 利用外辐射源探测目标若干问题研究[D]. 北京:北京理工大学, 2004. (LI Shuo. Research on several problems of detecting target using external radiation source[D]. Beijing,China:Beijing Institute of Technology, 2004.)
- [10] 杨博. 空基辐射源非合作探测系统关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2011. (YANG Bo. Study of key techniques on spatial emitter non-cooperative detection system[D]. Changsha,Hunan,China:National University of Defense Technology, 2011.)
- [11] 石林艳,蒋柏峰,王宏,等. 非合作探测技术与电子侦察技术的综合应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017,12(4):383-388. (SHI Linyan,JIANG Bofeng,WANG Hong,et al. Synthetic application of non-cooperation passive detection and electronic reconnaissance technology[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2017, 12(4):383-388.)
- [12] 唐济远,袁春珊. 基于 STFT 的信道化接收系统研究及设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):380-385. (TANG Jiyuan,YUAN Chunshan. Design of channelized receiver based on STFT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):380-385.)
- [13] 杨勇. 信号与系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2011. (YANG Yong. Signals and systems[M]. Xi'an,Shaanxi, China:Xidian University Press, 2011.)
- [14] 刘强,刘向君,周建平. 外军潜艇电子侦察系统技术现状与发展探析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4):541-

546. (LIU Qiang,LIU Xiangjun,ZHOU Jianping. Current status and development trend of electronic reconnaissance system for foreign submarine[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):541-546.)
- [15] 陈刚,王俊,王珏,等. 外辐射源雷达参考信号提纯方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018,40(1):45-49. (CHEN Gang, WANG Jun,WANG Yu,et al. Reference signal purifying method in passive bistatic radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018,40(1):45-49.)
- [16] 刘建言,艾俊强,王健. 反隐身预警雷达的发展动态与新技术[J]. 电讯技术, 2017,57(2):243-250. (LIU Jianyan,AI Junqiang,WANG Jian. Recent development and new technology of anti-stealth early warning radars[J]. Telecommunication Engineering, 2017,57(2):243-250.)
- [17] 钱李昌,许稼,胡国旭. 非合作无源双基地雷达弱目标长时间积累技术[J]. 雷达学报, 2017,6(3):259-266. (QIAN Lichang,XU Jia,HU Guoxu. Long-time integration of a multi-waveform for weak target detection in non-cooperative passive bistatic radar[J]. Journal of Radars, 2017,6(3):259-266.)
- [18] 陈黎,管吉兴,鲁振兴,等. 一种直线阵列接收通道校正技术[J]. 无线电工程, 2017,47(10):22-24,72. (CHEN Li,GUAN Jixing,LU Zhenxing,et al. Receiving channel calibration technology for linear array[J]. Radio Engineering, 2017,47(10): 22-24,72.)

作者简介：



朱拥建(1978-),男,江苏省南通市人,高级工程师,主要从事阵列信号处理、无源侦察定位和非合作探测定位总体技术研究.email:merry_dingdang@163.com.

刘远(1990-),男,河南省南阳市人,助理工程师,主要从事阵列信号处理仿真、非合作探测定位仿真研究.

石林艳(1968-),女,山东省邹城市人,高级工程师,主要从事阵列信号处理技术、复杂雷达信号处理技术和无源探测定位技术.

王宏(1972-),男,河北省邢台市人,研究员级高级工程师,主要从事电子对抗总体技术、非合作侦察定位技术和新体制无源探测定位技术.