

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.10.011

无线测向定位算法及实现系统*

冯永会 葛俊祥 李浩

(南京信息工程大学 电子与信息学院雷达技术研究所 南京 210044)

摘要:随着无线通信技术和卫星导航技术的发展,无源定位技术成为电子对抗领域的热点问题。主要对无源定位技术方法进行了分析,重点分析了无源测向定位相关理论,并提出了测向定位与几何联立的新算法。通过地面探测系统进行该算法的验证,得到目标辐射源的绝对误差在经度上为 $1.16^{\circ} \times 10^{-4}$,纬度上为 $1.04^{\circ} \times 10^{-4}$,其相对误差在经度上为 9.77×10^{-7} ,纬度上为 3.23×10^{-6} 。实际误差距离通过 MATLAB 计算得出为 26.67 m。通过实验验证与结果分析,对于不定时目标辐射源,该算法具有很好的有效性与可行性。

关键词:无源定位;定位算法;实现系统;误差分析

中图分类号: TN953⁺.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Wireless orientation and location algorithm and its implementation system

Feng Yonghui Ge Junxiang Li Hao

(Institute of Radar Technology, School of Electronics and Information, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: With the development of wireless communication technology and satellite navigation technology, passive positioning technology has become a hot topic in the field of electronic countermeasures. This paper mainly analyzes the passive positioning technology, focuses on the analysis of the theory of passive direction finding and proposes the algorithm of orientation and geometric union. Through the ground detection system to verify the algorithm, the absolute error of the target radiation source is $1.16^{\circ} \times 10^{-4}$ on the longitude and $1.04^{\circ} \times 10^{-4}$ on the latitude, the relative error is 9.77×10^{-7} on the longitude and 3.23×10^{-6} on the latitude. The actual error distance is 26.67 m calculated by MATLAB. Through experimental verification and result analysis, the algorithm is effective and feasible for non-timed target radiation sources.

Keywords: passive location; positioning algorithm; implementation system; error analysis

0 引言

随着电子信息技术的发展以及新型智能化武器系统的出现,定位技术迅速应用到军事与民用领域当中^[1-4],其中无源定位凭借不向外辐射电磁波不易被发现,作用距离远,隐蔽性好等优点在电子战与无线通信技术领域广泛应用^[5-6]。无源定位技术方法成为电子对抗领域的研究重点之一。无源定位技术的方法可按不同的方式进

行分类,如按观测站个数分类,可分为多站定位系统与单站定位系统;按目标辐射源的定位机理分类,可分为测向交叉定位、时间差定位以及多普勒频差定位等。随着无源技术的发展,依据可获得的目标源的不同参数,采用联合定位算法可以利用各种定位算法的优势,取长补短。因此,如何利用无源定位技术确定目标辐射源的准确位置信息,成为电子技术领域的重要课题。

本文主要采用单站测向定位对目标辐射源进行定位,提出测向定位与几何联立的新算法并运用实验验证

其结果的有效性与其可行性。这种算法对于不定时辐射目标具有强的适用性。

1 无源测向定位基础理论

1.1 无源定位结构

无源定位技术的基本理念是自身不向外辐射电磁波,利用接收到目标辐射源所辐射的电磁波或者反射的电磁波,通过对电磁信号的分析、处理确定其地理位置信息,从而完成定位功能^[1,5]。因此定位算法是本文学习研究的重点,具体定位实现如图 1 所示。

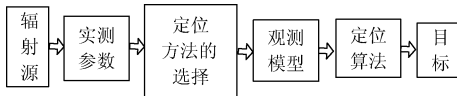


图 1 无源定位框图

Fig. 1 Block diagram of passive location

由图 1 可知,无源定位技术实施的关键在于定位方法与定位算法的选择。具体来说,实现无源定位可分为以下几个步骤:首先,利用无线电测向接收机获得多点目标的电磁辐射基本参数和方位信息;其次,根据卫星定位获得上述多个测试点的位置信息;最后,通过建立的观测模型,选择准确有效的定位算法,实现对探测目标的无源定位^[7-8]。

1.2 二维移动单站测向交叉定位

无源定位算法可在 MTALAB 软件平台上仿真实现,通过改善算法的性能,获得高精度无源定位的目的^[9-10]。本文主要开展了测向交叉定位算法的研究,运用移动单

站对固定探测目标辐射源进行测向定位。通过截取目标辐射源发射的电磁波信号和建立在 MTALAB 平台上的算法,获得目标的位置信息。

本文提出了一种移动单站多个测向位置点对固定辐射源定位的新算法。该算法将侧向交叉定位与几何概念联立起来,形成一种新的算法。其主要的内容是将不同位置的测向平台所测的方位角与自身地理位置信息进行处理,得出其交叉定位点。由于方位角的测量以及测向平台的放置都会产生不可避免的误差,因此,其交点就会形成不规则的多边形。每当移动单站测得目标辐射源的电磁信号时,在该位置的方位角只有一次数据信息可获得,因此当新截获的目标辐射源时,将新的位置信息跟方位角代入到方程中对之前所测的信息进行计算,得出新的测向线与之前每个测向线的交点。当有足够多的测向线相交时,其相交面积越来越小,交点密集,运用数据融合方法对不符合要求的估计目标辐射源位置坐标进行剔除,再运用几何概念引入圆心,得出其目标位置信息。这种算法对应于不定时目标辐射源,具有强的可适用性,引入几何概念,增加了算法准确率。在试验中采用地理位置信息变换高斯平面坐标,进行实际的运算。

移动单站测试平台如图 2 所示。在二维空间下研究,一个移动测向平台 A,一个固定目标辐射源 B,测向误差恒定不变。其移动的测试平台坐标位置分别为 $A_1(x_1, y_1), A_2(x_2, y_2), A_3(x_3, y_3), \dots, A_n(x_n, y_n)$ 。相对应的方位角依次为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$ 。设正北方向为基准,按照顺时针方向测试。因此,在实际的运算中,应该对方位角信息进行预处理。依据移动单站多点测向几何关系,可以获得目标辐射源 B 点的坐标如式(1)。

$$\begin{cases} x = \frac{x_1 \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_1) - x_2 \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_2) - y_1 + y_2}{\tan(\frac{\pi}{2} - \theta_1) - \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_2)} \\ y = \frac{y_2 \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_1) - y_1 \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_2) + \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_1) \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_2)(x_2 - x_1)}{\tan(\frac{\pi}{2} - \theta_1) - \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_2)} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,目标辐射源的位置坐标由测向方位角的精度所决定,同时受到测向平台地理位置坐标精度的影响。

实验中本文采用北斗一号获取 A 点的地理位置信息,而这个中间需要进行坐标转换^[11]。查阅文献资料可知,北斗一号是采用 1954 年北京坐标系,因此需要运用 BJ-54 坐标系进行高斯投影正反计算^[12]。本文算法中采用了 6°带投影法,建立高斯投影平面坐标。

高斯投影坐标正算公式如式(2)。

$$x = X + \frac{N}{2} \sin B \cos B l^2 + \frac{N}{24} \sin B \cos^3 B (5 - t + 9\eta^2 + 4\eta^4) l^4 + \frac{N}{720} \sin B \cos^5 B (61 - 58t^2 + t^4) l^6 \quad (2)$$

$$y = N \cos B l + \frac{N}{6} \cos^3 B (1 - t^2 + \eta^2) l^3 + \frac{N}{120} \cos^5 B (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2 \eta^2) l^5$$

其高斯投影反计算公式如式(3)。

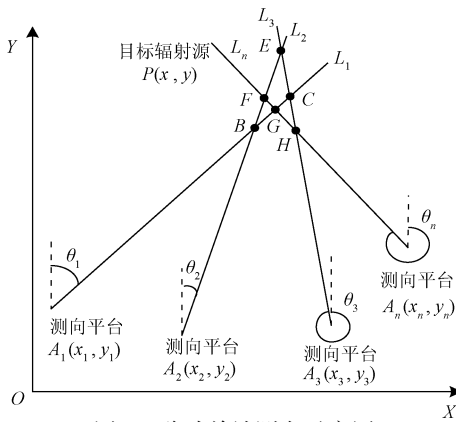


图2 移动单站测向示意图

Fig.2 Schematic diagram of moving single station orientation

$$B = B_f - \frac{t_f}{2M_f N_f} y^2 + \frac{t_f}{24M_f N_f^3} (5 + 3t_f^2 + \eta_f^2 - 9\eta_f^2 t_f^2) y^4 - \frac{t_f}{720M_f N_f^5} (61 + 90t_f^2 + 45t_f^4) y^6$$

$$l = \frac{1}{N_f \cos B_f} y - \frac{1}{6N_f^3 \cos B_f} (1 + 2t_f^2 + \eta_f^2) y^3 + \frac{1}{120N_f^5 \cos B_f} (5 + 28t_f^2 + 6\eta_f^2 + 24t_f^4 + 8t_f^2 \eta_f^2) y^5$$

(3)

式中: B 、 l 的单位为弧度。在大地坐标转换为高斯平面坐标时,由以上公式来进行计算移动测试单站的平面坐标。

将直接测得的大地坐标的经纬度信息转换为高斯投影平面坐标,提高了定位精度。其中每个地理位置点与其自身测得的方位角信息都能够形成一条方位线,因此不同的位置点所形成的方位线分别为 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ 。则依据测向交叉定理可以得出如下公式:

$$\begin{cases} y = y_1 + \tan\theta_1(x - x_1) \\ y = y_2 + \tan\theta_2(x - x_2) \\ y = y_3 + \tan\theta_3(x - x_3) \\ \vdots \\ y = y_n + \tan\theta_n(x - x_n) \end{cases}$$

(4)

从理论上讲,所有的方位线应该交于一点,但是由于测向平台误差,天线方位角的误差等,因此,大多数方位线常常交于多个位置点,如图2所示,交点为 B, C, E, F, G, H 等。不断移动单站点,增加其位置信息与方位角信息,交点将越来越密集^[8,13]。所有交点的地理位置信息集合为:

$$\{S_i = (x_i, y_i), (i = n)\}$$

对这些估计位置坐标进行综合分析,主要包括两个方面的内容,一方面将得到的异常坐标值进行剔除,排除异常点坐标,另一方面将剩余的数据坐标进行融合计算,提高了数据的利用率和准确度^[8]。将其剔除异常点后的所有目标辐射源有效位置坐标的集合为:

$$\{S_i = (x_i, y_i), (i = m)\}$$

这里还要引入凸包的概念^[14],将所得的坐标位置点信息进行综合,将所有的位置点信息包含进去,由此可以看到所有的目标辐射源估计坐标位置信息。在本文的研究中,主要运用了 Graham 扫描法进行了凸包的求解^[13]。

运用几何概念,在进行凸包算法之后,再次运用内接圆心的概念,得出其圆心坐标即为估算的地理位置坐标^[7-9]。由图2可知通过不同的方位角,实际得出的目标位置的估计点是三角形的形状,以往算法中常常用圆将所有的目标估计点位置包含其中,依据三角形内接圆定理,三角形的内接圆圆心是到各个方位线最短距离的点,其圆内包括超过50%的目标估计点,我们将其圆心定义为目标的估计点。通过高斯投影反算公式得出其大地坐标经纬度地理位置信息。

2 移动单站对固定频率源系统实验模型与结果分析

本文就提出的新的算法进行了原理性实验测试与验证,主要采用的是 MATLAB 软件进行数据的处理与分析,本次实验场地是本校操场,以微波信号源做为目标辐射源,以便携式频谱仪为移动接收终端,手持北斗一号接收机可获得各移动点的地理位置与方位角信息。在高斯投影平面坐标系中,其纬度的换算横坐标为 x 轴,以中央子午线的投影为纵坐标 y 轴。其交点为坐标原点 O 。实验模型如图3所示。

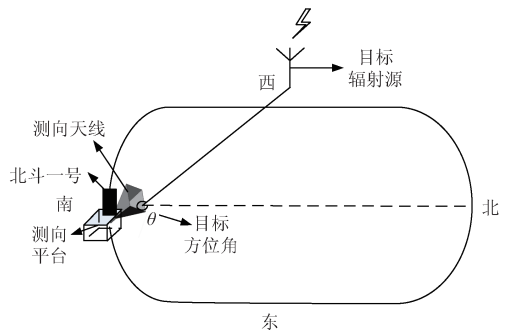


图3 测向实验模型

Fig.3 Experimental model of orientation

如图3所示,选定目标辐射源发射目标信号,运用测向天线接收目标辐射源发射的信号,信号功率最强时测得其方位角并用北斗一号测得此时的经纬度地理位置信息^[15]。实验的场地在为操场800m跑道,移动平台随机测试位置信息,运用北斗一号移动终端采集17个经纬度地理位置信息。

实验定位结果分析如下。

在实验场地操场800m跑道上,移动平台随机测试目标位置,通过北斗一号移动终端采集17个地理位置信

息。为了避免实验的偶然性,所得地理位置信息和方位角均采取多次测量求其均值,减小测量误差。将所得的地理位置信息进行高斯正算,解得其在高斯平面坐标下的坐标位置。在我国进行高斯投影换算时一般为了避免出现负的经度转换坐标,在此坐标加上 500 000 m,但是本文高斯转换算法因为其中央子午线为 117°,测试点经度位于中央子午线的右侧,就不必考虑负的坐标的问题。将所测得地理位置信息进行高斯正算,得到的平面坐标如图 4 所示。

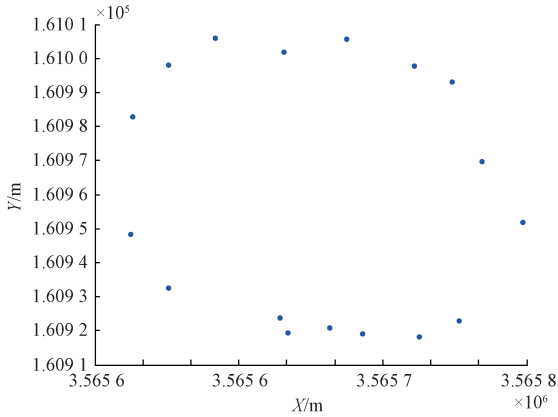


图 4 经纬度的平面直角坐标转

Fig. 4 Coordinate rotation of latitude and longitude

运用测向定位原理,将所有位置点坐标与方位角所得的方位线进行两两相交,理论上交于一点,实际上由于误差的存在会产生不同的交点,并将这些估计目标的位置点进行凸包算法。目标辐射源的估计坐标点凸包如图 5 所示,但是在图中可以看出其存在着一些异常点,干扰点,采用数据融合的算法进行目标估计坐标数据进行处理,减少误差,提高算法的准确度。

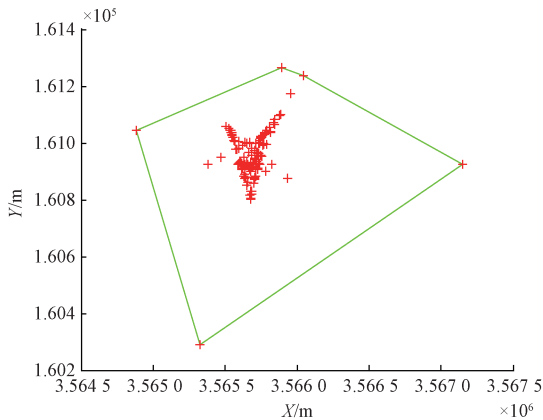


图 5 估计目标辐射源的凸包算法

Fig. 5 The convex hull algorithm for estimating target radiation source

有效的目标辐射源估计位置坐标信息凸包内切圆如图 6 所示,经过数据加权融合与平均融合处理,剔除了异常点,得到有效的目标辐射源估计坐标,又通过凸包算法,将其有效的目标数据概括其中。在 MATLAB 中仿真计算其有效目标辐射源信息凸包算法,得到其内接圆圆心为 $x = 5.56575 \times 10^6, y = 1.6093 \times 10^5$ 。此圆心即为所求的目标辐射源的位置坐标信息,再通过高斯反算得到其经度为 118.706 626°,纬度为 32.202 704°。

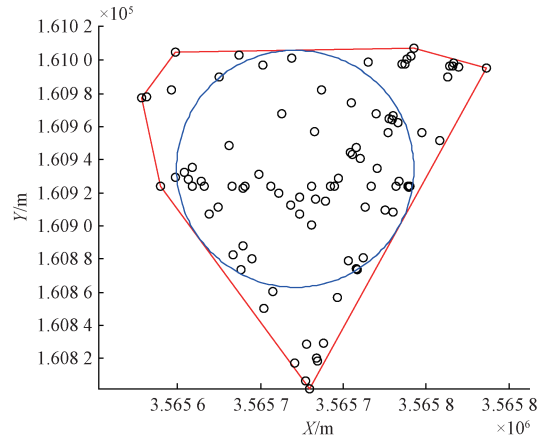


图 6 有效估计目标辐射源凸包内切圆算法

Fig. 6 Convex hull inscribed circle algorithm for effective estimating target radiation source

如图 7 所示,估计目标辐射源为加号图标,实际目标辐射源为红色圆形图标。在试验中其实际的目标辐射源位置经度为 118.706 510°,纬度为 32.202 6°,估计目标辐射源平面坐标高斯反算得到其经度为 118.706 626°,纬度为 32.202 704°。将两者进行对比,其绝对误差在经度上误差 $1.16^\circ \times 10^{-4}$,纬度上误差 $1.04^\circ \times 10^{-4}$,其相对误差在经度上误差为 9.77×10^{-7} ,纬度上误差为 3.23×10^{-6} 。实际误差距离通过 MATLAB 计算得出为 26.67 m。

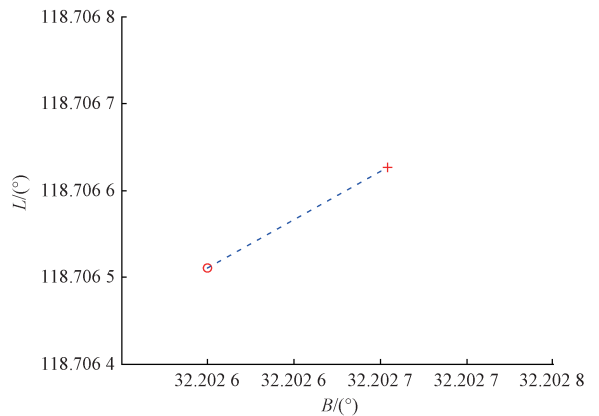


图 7 实际目标辐射源与估计目标辐射源的比较

Fig. 7 Comparison of the actual target radiation source and the estimated target radiation source

测向定位与几何圆心联合的定位算法以实验的形式进行原理性的验证,最终得出其定位结果。对于目标辐射源不定时辐射电磁信息,其算法具有可实现,强适用性。由实验结果,也得到了有效的目标辐射源估计位置,通过内接圆减少了不规则区域带来的定位影响。对结果进行误差分析,其主要来源包括测向误差,平台误差,以及北斗一号的定位精度。而整个实验过程,验证了算法的有效性,可行性。

3 结 论

随着无线通信的快速发展,无源定位技术成为无线通信与电子对抗领域中的研究热点,引起国内外的广泛关注。本文就无源测向定位技术进行深入研究,提出了测向交叉定位与几何联立算法,并通过实验进行原理性验证。通过外场实验确定其采集到的位置数据及方位角数据信息。再运用 MATLAB 软件编程算法进行验证,并对结果进行误差分析,整个实验过程,验证了算法的有效性,可行性。

参考文献

- [1] 乐志伟,王浩,谢小军. 基于 RSSI 障碍势能矫正的定位算法[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(2):200-207.
LE ZH W, WANG H, XIE X J. Localization algorithm based on RSSI obstacles potential energy correction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(2):200-207.
- [2] 黄丹平,于少东,田建平,等. 基于电力线室内定位算法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(1):136-143.
HUANG D P, YU SH D, TIAN J P, et al. Research on indoor positioning algorithm based on power-line [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument., 2016,37(1):136-143.
- [3] 钟晴,叶芝慧,郭小青. 基于 RFID 室内可视化定位系统设计与实现[J]. 电子测量技术,2016,39(8):186-190.
ZHONG Q, YE ZH H, GUO X Q. Design and implementation of RFID-based indoor visual positioning system [J]. Electronic measurement technology, 2016, 39(8):186-190.
- [4] 怀洋,邵琼玲,路振民. 北斗/GPS 混合定位模块 UM220 应用研究[J]. 国外电子测量技术,2014,33(3):76-79.
HUAI Y, SHAO Q L, LU ZH M. Application research of UM220 Beidou/GPS hybrid position module [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(3):76-79.
- [5] 王本才,张国毅,侯慧群. 无源定位技术研究[J]. 舰船电子对抗,2006,29(6):20-26.
WANG B C, ZHANG G Y, HOU H Q. Study of Passive Location Technologies [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2006, 29(6):20-26.
- [6] 郁春来,张元发,万方. 无源定位技术体制及装备的现状与发展趋势[J]. 空军预警学院学报,2012,26(2):79-85.
YU CH L, ZHANG Y F, WANG F. Present situation and development trend of passive location technology system and equipment [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012, 26(2):79-85.
- [7] 张国凯,戴霄,何佳洲. 纯方位交叉定位算法分析[J]. 指挥控制与仿真,2013,35(6):40-44.
ZHANG G K, DAI X, HE J ZH. Analysis on bearing-only cross-location algorithm [J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(6):40-44.
- [8] 雷雨,冯新喜,朱灿彬,等. 基于数据融合理论的多传感器几何定位算法[J]. 红外与激光工程,2012,41(5):1339-1344.
LEI Y, FENG X X, ZHU C B, et al. Geometric location algorithm for multi-sensor networking based on data fusion theory [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5):1339-1344.
- [9] 郑春锋. 无线电监测中对干扰源的无源测向定位研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
ZHENG CH F. Passive bearing-only localization research for interference source in the radio monitoring [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2014.
- [10] 李婷. 地下震源波束交叉定位算法研究[D]. 太原:中北大学,2015.
LI T. Research of underground seismic source localization algorithm based on beam coss [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [11] 刘平,段志强,谢超. 基于 Matlab 的七参数空间坐标转换研究与实现[J]. 地理空间信息,2014(6):62-64.
LIU P, DUAN ZH Q, XIE CH. Research and implementation of seven-parameter spatial coordinate transformation based on MATLAB [J]. Geospatial Information, 2014(6):62-64.
- [12] 冯亚明. 高斯投影正反算的递推算法[J]. 测绘与空间地理信息,1997(3):22-24.
FENG Y M. Recursive algorithm for positive and negative of Gaussian projection [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 1997(3):22-24.
- [13] GRAHAM R L. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set [J]. Information Processing Letters, 1972,1(4):132-133.

- [14] TAYLOR A E, DAVIS P J. Introduction to functional analysis[J]. Physics Today, 1959, 12(6):48.
- [15] 黄玮.“北斗一号”系统定位误差的测试与分析[D]. 大连:大连海事大学,2012.
- HUANG W. The measurement and analysis of the positioning error for the compass navigation system[D]. Dalian:Dalian Maritime University,2012.

作者简介



冯永会,1990 年出生,2014 年于郑州轻工业学院获得学士学位,现为南京信息工程大学电子与信息工程学院在读硕士研究生,主要研究方向为雷达信号探测与射频电路。
E-mail:fyh1206976673@126.com

Feng Yonghui was born in 1990,

received B. Sc. from Zhengzhou University of Light Industry in 2014. Now She is a M. Sc. candidate at Nanjing Information Engineering University. Her main research direction is radar signal detection and RF circuit.



葛俊祥(通讯作者),1960 年出生,博士生导师,现为南京信息工程大学教授,主要从事雷达系统、微波毫米波与天线技术、电磁理论的研究。

E-mail:jxge@nuist.edu.cn

Ge Junxiang (Corresponding author) was born in 1960. Now he is a professor and Ph. D. supervisor at Nanjing Information Engineering University. His main research direction is radar systems, microwave millimeter wave and antenna technology, and electromagnetic theory study.