

文章编号: 2095-4980(2023)10-1224-06

## 基于多天线到达相位差的室内定位算法

洪鑫磊, 崔英花\*

(北京信息科技大学, 信息与通信工程学院, 北京 100101)

**摘要:** 针对测距式射频识别(RFID)室内定位算法的精确度会受到测距误差严重影响的问题, 提出一种基于多天线到达相位差(M-PDOA)的室内定位算法。通过 M-PDOA 测距方法进行测距, 采用三边测量算法对目标标签进行定位。仿真结果显示, 本算法的测距平均误差为 0.102 7 m, 性能提升 65.76%; 定位平均误差为 0.180 7 m, 性能提升 56.67%, 说明本文算法能够有效减少测距误差, 并且定位精确度较高。

**关键词:** 室内定位; 射频识别; 多天线; 到达相位差

**中图分类号:** TN911.2

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021283

## Indoor positioning algorithm based on multi-antenna PDOA

HONG Xinlei, CUI Yinghua\*

(School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The accuracy of the range-finding Radio Frequency Identification(RFID) indoor positioning algorithm will be seriously affected by ranging error. An indoor positioning algorithm based on Multi-antenna Phase Difference Of Arrival(M-PDOA) is proposed. M-PDOA ranging method is employed to measure the distance. The trilateral positioning algorithm is adopted to position the target tag. The simulation results show that the average ranging error of the algorithm is 0.102 7 m, which has a performance improvement by 65.76%; the average error of positioning is 0.180 7 m, which has a performance improvement by 56.67%, indicating that the proposed algorithm can effectively reduce the ranging errors and has high positioning accuracy.

**Keywords:** indoor positioning; Radio Frequency Identification; multi-antenna; Phase Difference Of Arrival

随着科学技术的发展和人们生活工作的需要, 人们对室内位置服务(Indoor Location Based Services, ILBS)的需求越来越高, 传统的卫星定位<sup>[1-3]</sup>方法由于卫星信号在室内复杂环境中受到遮蔽快速衰减而无法满足人们对室内定位的需求。近年来, 许多专家学者对室内定位方法进行了详尽的研究。迄今为止, 已经有红外技术、超声波技术、超宽带技术、无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)技术和 RFID 技术<sup>[4]</sup>等被广泛地应用于室内定位中。其中 RFID 技术具有无需直接接触、利用无线射频信号完成信息的提取和传送、非视距传播、识别速度快的特点, 其电子标签也具有体积小、读写快、成本低廉、可重复使用等优点。RFID 技术凭借其众多的优势, 逐渐地在室内测距和定位研究中脱颖而出, 获得了越来越多的关注。

RFID 测距技术主要有基于接收信号强度(Received Signal Strength Indication, RSSI)、基于到达时间(Time of Arrival, TOA)或到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)和基于到达相位差(Phase Difference of Arrival, PDOA)等技术。Lionel 等<sup>[5]</sup>提出的 LANDMARC 室内定位算法, 将 RFID 标签应用于室内定位系统中, 此算法利用 K 最近邻算法进行定位。J Hightower 等提出了 SpotoN 系统<sup>[6]</sup>, 此系统利用 3 个或以上的 RFID 阅读器记录标签 RSSI 值, 并利用三角定位法计算出标签位置。文献[7]提出了一种基于超高频(Ultra-High Frequency, UHF)RFID 的定位系统, 该系统中的 PN 序列用来测量 TOA 以及估计阅读器到标签的距离。文献[8]为了减小射频信号的定

收稿日期: 2021-07-16; 修回日期: 2021-10-14

基金项目: 北京市自然科学基金面上资助项目(4202024); 促进内涵发展科研水平提高项目重点研究培育项目(2020KYNH213)

\*通信作者: 崔英花 email:cui\_ying\_hua@sina.com

位误差，提出了一种利用射频信号的 TDOA 信息，通过构造虚拟参考标签进行双曲线定位的算法。但因精确度不足、基于时间信息的测距技术对系统时间同步的要求很高等问题，可以利用载波相位对时间和距离敏感的特点提高测距和定位性能。Li 等<sup>[9]</sup>提出了一种多频载波相位的定位算法，该算法在双频载波相位差的基础上利用余数定理选择出能够更好解算整周模糊度的频率组合，获得了更大的非模糊距离。Liu 等<sup>[10]</sup>利用并列放置多个天线测量标签相位的方法，构建 PDOA 双曲线方程组，再通过求解双曲线交点得到目标位置。虽然 RFID 相位具有较好的稳定性和对距离变化灵敏度高的特点，但是在测量阶段会受到室内环境的影响<sup>[11]</sup>而出现误差，这也是目前急需解决的问题。

近年来，随着多天线技术快速发展，多天线技术也逐渐被应用于室内定位技术中以提升定位精确度。文献[12]研究了一种基于多天线技术的 M-KNN(Multi-antenna K-Nearest Neighbor)算法，利用多个天线获取目标标签信息并进行定位。文献[13]提出一种基于 3 个定向天线的二维到达角度(Angle of Arrival, AoA)估计算法，利用 3 个定向天线实现波束切换，对多种干扰进行抑制并在定位区域内对目标进行到达角估计和定位。

本文提出利用多天线技术进行 PDOA 测距，用于减小测距误差；用三边测量算法对目标标签进行定位，提高了系统的测距和定位的精确度。

## 1 多天线 PDOA 测距模型

### 1.1 PDOA 测距原理

相位是 RFID 信号的一个重要特征，由于其对距离极其敏感的特征，可以用来进行测距。假设 RFID 阅读器发射天线到目标标签的距离为  $d$ ，当 RFID 阅读器天线与目标标签通信时，信号先由天线发出，传播至标签后，再由标签将接收到的信号反射回天线，信号的实际传输距离为  $2d$ 。当系统工作时，阅读器能够读取反射信号相位值，反射信号的相位值  $\theta$  与 RFID 阅读器发射天线到目标标签的距离关系可由式(1)表示：

$$\begin{cases} \theta = \left( 2\pi \left( \frac{2d}{\lambda} \right) + \mu \right) \bmod (2\pi) \\ \mu = \theta_T + \theta_R + \theta_{TAG} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\lambda$  为 RFID 信号波长； $d$  为天线到标签的距离； $\theta_T$ 、 $\theta_R$ 、 $\theta_{TAG}$  分别为由阅读器天线的发射电路、阅读器天线的接收电路和 RFID 标签的反射特性导致的相位偏移。

由于相位的周期性，无法直接利用式(1)对距离  $d$  进行计算，需要进行处理才可以使用。当阅读器天线向目标标签发射频率不同的 2 个 RFID 信号时(频率分别为  $f_1$ 、 $f_2$ )，阅读器天线接收到的反射信号的相位值分别为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ ，则有式(2)和式(3)：

$$\begin{cases} \theta_1 = \left( 2\pi \left( \frac{2d}{\lambda_1} \right) + \mu \right) \bmod (2\pi) \\ \mu = \theta_T + \theta_R + \theta_{TAG} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \theta_2 = \left( 2\pi \left( \frac{2d}{\lambda_2} \right) + \mu \right) \bmod (2\pi) \\ \mu = \theta_T + \theta_R + \theta_{TAG} \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)减去式(3)可得

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = 2\pi \left( \frac{2d}{\lambda_1} - \frac{2d}{\lambda_2} \right) \quad (4)$$

式中  $\Delta\theta$  为阅读器天线接收到的 2 个反射信号相位值的差值。

当 2 个 RFID 信号经过相同的待测距离时，就可以利用上述公式的相位差得到信号的传播距离，即阅读器到标签的距离，根据  $\lambda = c/f$ ，可以将式(4)转化为式(5)：

$$d = \frac{c\Delta\theta}{4\pi \times \text{abs}(f_1 - f_2)} \quad (5)$$

由此可得，阅读器天线只需发射 2 个频率不同的 RFID 信号到达标签，经过相同的传输距离后，接收到 2 个不同的相位值，即可求解出阅读器到目标标签之间的距离。

## 1.2 多天线 PDOA 测距模型

为进一步减小测距误差,提出一种基于多天线的 PDOA 测距方法,如图 1 所示。系统由 3 部分组成,分别是阅读器、天线和目标标签。其中,阅读器与天线为利用射频线缆连接的分离式部署,1 个阅读器连接 4 根天线。

多天线测距流程为:

步骤 1: 依次控制阅读器通过连接的 4 根天线发射频率为  $f_1$  和  $f_2$  的 RFID 信号;

步骤 2: 阅读器读取频率在  $f_1$  和  $f_2$  下的标签反射信号的载波相位  $\theta_1$  和  $\theta_2$  以及入射角度  $\alpha$ ;

步骤 3: 利用式(5)分别计算目标标签到天线之间的距离  $d_i(i=1,2,3,4)$ ;

步骤 4: 构造测距三角形,利用式(6)计算目标标签到阅读器之间的距离  $D_i(i=1,2,3,4)$ :

$$D_i = \sqrt{d_i^2 + d_0^2 - 2d_i d_0 \cos \alpha} \quad (6)$$

式中  $d_0$  为天线到阅读器之间的距离。

步骤 5: 利用式(7)计算最终的多天线 PDOA 测距结果  $D$ 。

$$D = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 D_i \quad (7)$$

## 2 多天线室内定位算法方案

### 2.1 三边测量算法

三边测量(Trilateration)算法是一种基于距离关系的定位算法。该算法原理简单,易于实现<sup>[14]</sup>,已成为广泛使用的定位算法。其定位原理如图 2 所示,在已知 3 个坐标到待定位目标的距离时,以 3 个已知坐标为圆心,以距离为半径画圆,3 个圆的交点就是待定位目标的实际位置。即利用待定位的目标到 3 个不同的已知坐标的距离建立方程组,并依据方程组计算出待定位节点的真实位置坐标。

图 2 中,现有 3 个已知坐标  $S_1 = [x_1, y_1]^T$ 、 $S_2 = [x_2, y_2]^T$ 、 $S_3 = [x_3, y_3]^T$  和 1 个待定位目标  $S_0 = [x_0, y_0]^T$ , 已知坐标  $S_i(i=1,2,3)$  到待定位目标  $S_0$  的距离  $d_i$  为:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, i=1,2,3 \quad (8)$$

即可通过如下 3 个已知坐标到待定位目标的距离估计出待定位目标  $S_0$  的具体位置:

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \\ d_3 = \sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2} \end{cases} \quad (9)$$

但在实际情况中,由于噪声等环境影响,距离测量产生的误差会使 3 个圆无法交于一点,而是两两相交形成一片三角形区域。假设三角形区域由 3 个圆的交点  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  组成,如图 3 所示。待定位节点的距离位置就在这片三角形区域里,则该三角形区域的质心坐标即为待定位目标的位置。即两两联立式(9)得到  $P_1 = (X_1, Y_1)$ 、 $P_2 = (X_2, Y_2)$ 、 $P_3 = (X_3, Y_3)$ 。则待定位目标的位置坐标如式(10)所示:

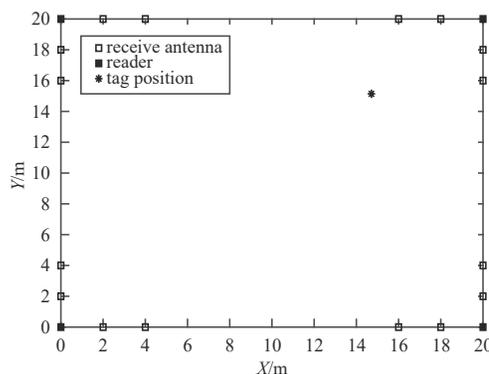


Fig.1 Schematic diagram of multi-antenna PDOA ranging  
图 1 多天线 PDOA 测距示意图

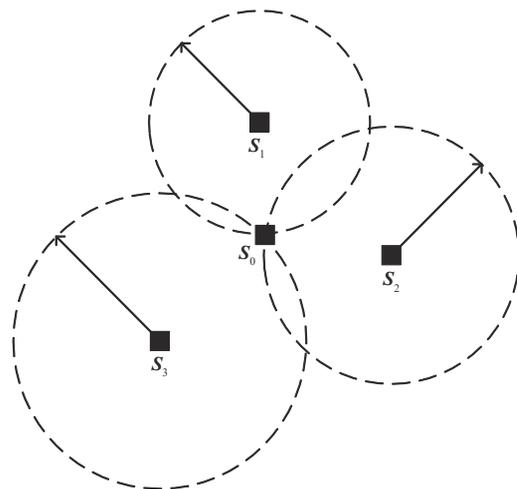


Fig.2 Schematic diagram of trilateral measurement  
图 2 三边测量原理图

$$\begin{cases} x_0 = (X_1 + X_2 + X_3) / 3 \\ y_0 = (Y_1 + Y_2 + Y_3) / 3 \end{cases} \quad (10)$$

2.2 多天线室内定位算法实现

基于多天线 PDOA 的室内定位算法，首先利用多天线 PDOA 测距算法对待定位的目标标签进行测距，测量得到目标标签到 4 个阅读器之间的距离，然后根据三边测量法从 4 个距离中选出 3 个进行定位，重复选择不同的距离组合进行定位，直到 4 种组合全部定位结束，并将 4 个定位结果进行平均计算作为算法最后的定位结果。算法的具体步骤如下：

步骤 1：算法初始化；

步骤 2：对目标进行多天线 PDOA 测距，得到目标标签到 4 个阅读器的距离；

步骤 3：从 4 个目标标签到阅读器之间的距离中选出 3 个进行三边测量法定位；

步骤 4：重复步骤 3，选择其他 3 种不同的距离组合进行三边测量法定位；

步骤 5：将 4 次三边测量法定位的结果进行平均计算，得到最终的定位结果。

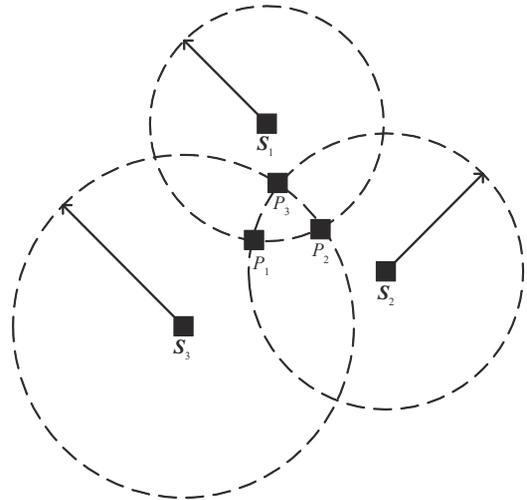


Fig.3 Schematic diagram of trilateral measurement(noise included)  
图3 三边测量原理图(含噪声)

3 实验结果及分析

为说明本文算法在室内定位中的优越性和准确性，先进行多天线 PDOA 测距与单天线 PDOA 测距的对比，然后进行基于多天线室内定位算法和基于单天线室内定位算法的对比，最后对比了本文算法与基于多天线技术的 M-KNN 室内定位算法的定位平均误差。在 20 m×20 m 的定位区域四角各放置一个阅读器，在阅读器左右 2 m、4 m 位置分别放置 1 根天线组成多天线系统，在定位区域内随机放置 20 个目标标签进行测距和定位。测距误差对比如图 4 所示。

由图 4 可知，基于多天线 PDOA 测距的平均误差为 0.102 7 m，基于单天线 PDOA 测距的平均误差为 0.299 9 m，测距性能提升了 65.76%。多天线 PDOA 测距算法有效降低了测距过程中的误差。

图 5 为多天线室内定位图，图 6 为单天线室内定位图，图中\*为目标标签的实际坐标，○为目标标签的估计坐标。图 7 为定位误差对比图。

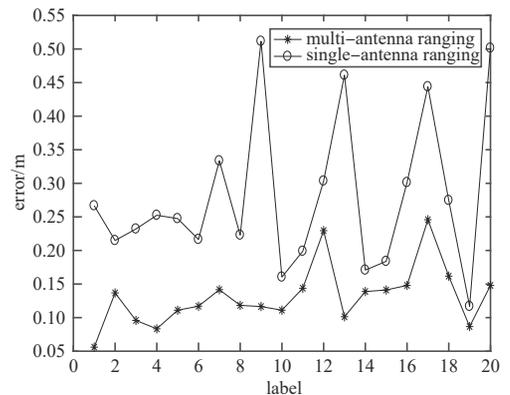


Fig.4 Ranging error comparison  
图4 测距误差对比图

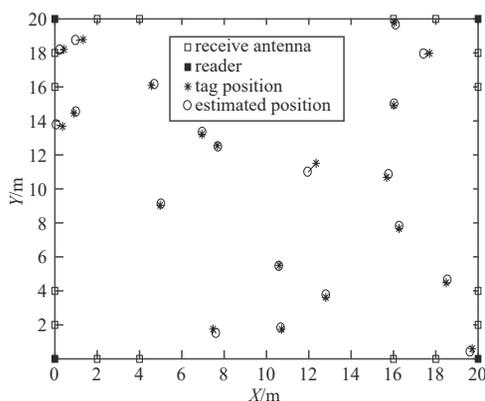


Fig.5 Multi-antenna indoor location map  
图5 多天线室内定位图

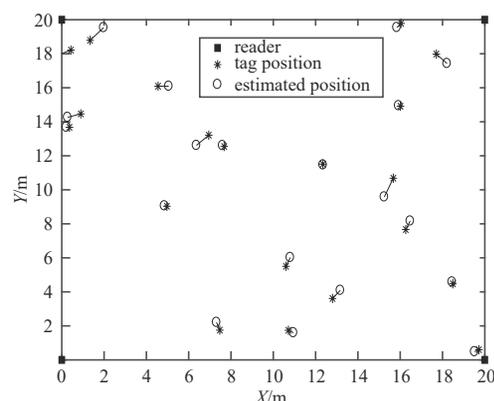


Fig.6 Single-antenna indoor location map  
图6 单天线室内定位图

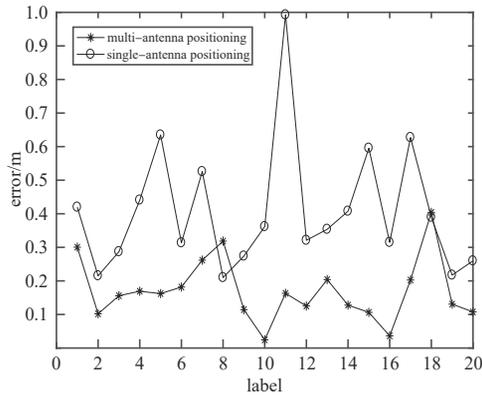


Fig.7 Positioning error comparison  
图7 定位误差对比图

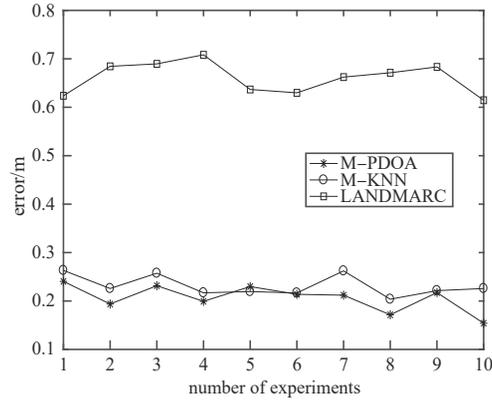


Fig.8 Error comparison of different algorithms  
图8 不同算法误差对比图

由图5、图6和图7可知，多天线室内定位算法的误差在0.024 3~0.404 1 m之间波动，平均误差为0.180 7 m；单天线室内定位算法的误差在0.209 9~0.992 7 m之间波动，平均误差为0.417 0 m，定位性能提升了56.67%，并且更加稳定。可以看出，因为测距误差的减小，三边测量定位算法的定位精确度有了显著提升。

为进一步说明本文提出算法的优越性，将本文提出的M-PDOA算法与M-KNN算法和LANDMARC算法进行误差对比。对比试验共进行了10次，得到的结果如图8所示。M-PDOA算法的平均误差为0.206 4 m，M-KNN算法的平均误差为0.231 3 m，LANDMARC算法的平均误差为0.660 4 m。由此可以看出，本文提出的M-PDOA算法相对于其他算法，误差范围最小，性能最佳。

#### 4 结论

本文提出了基于多天线的PDOA室内定位算法，首先利用多天线技术进行PDOA测距，减小了测距误差；然后利用三边测量算法进行定位。对利用多天线PDOA测距的室内定位算法进行了仿真验证，并与经典的LANDMARC算法和基于多天线技术的M-KNN室内定位算法进行了对比，结果表明，本文提出的算法定位精确度高，定位效果稳定。

#### 参考文献：

- [1] KAISER S A, CHRISTIANSON A J, NARAYANAN R M. Global positioning system processing methods for GPS passive coherent location[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(9): 1406–1416. doi:10.1049/iet-rsn.2017.0010.
- [2] 王敬平, 姜鑫, 褚少鹤, 等. 北斗卫星导航系统定位精度研究[J]. 软件, 2019, 40(10): 152–154. (WANG Jingping, JIANG Xin, CHU Shaohe, et al. Research on the positioning accuracy of Beidou satellite navigation system[J]. Computer Engineering & Software, 2019, 40(10): 152–154.) doi:10.3969/j.issn.1003-6970.2019.10.034.
- [3] 王卓群, 王驹, 李亚军, 等. 基于GDOP的四星时差定位精确度分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(5): 808–812, 819. (WANG Zhuoqun, WANG Ju, LI Yajun, et al. Precision analysis of four-satellite TDOA location based on geometric dilution of precision[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(5): 808–812, 819.) doi:10.11805/TKYDA2018158.
- [4] HOU Zhouguo, LI Fang, YAO Yi. An improved indoor UHF RFID localization method based on deviation correction[C]// 2017 The 4th International Conference on Information Science and Control Engineering(ICISCE). Changsha, Hunan, China: IEEE, 2017: 1401–1404. doi:10.1109/ICISCE.2017.291.
- [5] NI L M, LIU Yunhao, LAU Y C, et al. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID[J]. Wireless Networks, 2004, 10(6): 701–710. doi:10.1023/B:WINE.0000044029.06344.dd.
- [6] HIGHTOWER J, BORRIELLO G, WANT R. SpotON: an indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength: UW CSE00-02-02[R]. Washington: University of Washington, 2000.
- [7] XIONG Tingwen, LIU Junjuan, YANG Yuqing, et al. Design and implementation of a passive UHF RFID-based real time location system[C]// Proceedings of 2010 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test. Hsinchu, Taiwan, China: IEEE, 2010: 95–98. doi:10.1109/VDAT.2010.5496700.
- [8] 殷桂华, 王小辉, 雷毅谈. 基于TDOA的室内运动目标双曲线RFID定位方法[J]. 计算机应用, 2014, 34(z2): 52–54. (YIN Guihua, WANG Xiaohui, LEI Yitan. RFID hyperbolic positioning using TDOA method for indoor moving target[J]. Journal of

- Computer Applications, 2014,34(z2):52–54.) doi:CNKI:SUN:JSJY.0.2014–S2–015.
- [9] LI Xin, ZHANG Yimin, AMIN M G. Multifrequency–based range estimation of RFID tags[C]// 2009 IEEE International Conference on RFID. Orlando,FL,USA:IEEE, 2009:147–154. doi:10.1109/RFID.2009.4911199.
- [10] LIU Tianci, YANG Lei, LIN Qiongzhen, et al. Anchor–free backscatter positioning for RFID tags with high accuracy[C]// IEEE INFOCOM 2014—IEEE Conference on Computer Communications. Toronto, ON, Canada: IEEE, 2014: 379–387. doi: 10.1109/INFOCOM.2014.6847960.
- [11] 蒋悦. 基于多维标度的多目标 UHF RFID 定位技术的研究[D]. 天津:天津大学, 2018. (JIANG Yue. Multi–target localization technology research based on MDS for UHF RFID[D]. Tianjin,China:Tianjin University, 2018.) doi:10.27356/d.cnki.gtjdu.2018.001167.
- [12] 丁晔. 基于 RFID 信号特征的室内定位技术研究与实现[D]. 南京:南京邮电大学, 2018. (DING Ye. Research and implementation of indoor positioning based on RFID signal characteristics[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.) doi:CNKI:CDMD:2.1018.898768.
- [13] 冷文. 基于三个定向天线 RSS 的二维到达角估计[J]. 计算机工程, 2021,47(5):160–168,175. (LENG Wen. 2D AoA estimation based on RSS of three directional antennas[J]. Computer Engineering, 2021,47(5): 160–168,175.) doi: 10.19678/j.issn.1000–3428.0057714.)
- [14] 朱剑,赵海,孙佩刚,等. 基于 RSSI 均值的等边三角形定位算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007,28(8):1094–1097. (ZHU Jian, ZHAO Hai, SUN Peigang, et al. Equilateral triangle localization algorithm based on average RSSI[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2007,28(8):1094–1097.) doi:10.3321/j.issn:1005–3026.2007.08.008.

#### 作者简介:

洪鑫磊(1997–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 RFID 室内定位 .email:1085328392@qq.com.

崔英花(1973–), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为射频识别、无线定位等.

(上接第 1210 页)

- [8] 李金磊,罗积润,樊宇. 交错双栅慢波结构的等效电路法研究[J]. 真空科学与技术学报, 2017,37(5):510–518. (LI Jinlei,LUO Jirun,FAN Yu. Equivalent circuit analysis of staggered double–grating slow–wave structure[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017,37(5):510–518.) doi:10.13922/j.cnki.cjovst.2017.05.13.
- [9] ANTONSEN T M, VLASOV A N, CHERNIN D P, et al. Transmission line model for folded waveguide circuits[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013,60(9):2906–2911. doi:10.1109/TED.2013.2272659.
- [10] ANTONSEN T M, CHERNIN D, VLASOV A, et al. A simple hybrid circuit model for folded waveguide structures[C]// IVEC 2012. Monterey,CA,USA:IEEE, 2012:551–552. doi:10.1109/IVEC.2012.6262274.
- [11] CHERNIN D, ANTONSEN T M, VLASOV A N, et al. 1D large signal model of folded–waveguide traveling wave tubes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(6):1699–1706. doi:10.1109/TED.2014.2298100.
- [12] 张金睿,张长青,冯进军. 太赫兹交错栅慢波结构高频特性理论研究[J]. 红外与毫米波学报, 2021,40(2):263–271. (ZHANG Jinrui,ZHANG Changqing,FENG Jinjun. Theoretical study on high frequency characteristics of terahertz staggered grating slow–wave structure[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021,40(2):263–271.)
- [13] MCVEY B D, BASTEN M A, BOOSKE J H, et al. Analysis of rectangular waveguide–gratings for amplifier applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994,42(6):995–1003. doi:10.1109/22.293568.
- [14] 曹旺. Matlab 智能优化算法:从写代码到算法思想[M]. 北京:北京大学出版社, 2021. (CAO Wang. Modern intelligent optimization algorithm based on Matlab: from coding to algorithmic thought[M]. Beijing:Peking University Press, 2021.)
- [15] LAI Jianqiang, GONG Yubin, XU Xiong, et al. W–band 1 kW staggered double–vane traveling–wave tube[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012,59(2):496–503. doi:10.1109/TED.2011.2174458.

#### 作者简介:

刘英洲(1999–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波电子学领域 .email:eagle9326@163.com.

冯进军(1966–), 男, 博士, 研究员, 中国电科首席科学家, 主要研究方向为短毫米波和太赫兹真空电子器件.

张长青(1982–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹行波管及带状注器件.