

基于机械臂毫米波天线测试系统设计与实现

李晓峰¹, 邓 晔^{1,2}, 乔淑君¹, 曾 欣¹

(1. 南京电子技术研究所, 南京 210039; 2. 天线与微波技术重点实验室, 南京 210039)

摘要: 测试天线波瓣图是分析天线性能的重要方法, 随着毫米波天线的大量应用, 如何开发出部署灵活, 成本较低的毫米波天线测试系统, 成为毫米波天线大批量生产的关键, 针对此问题, 开发出了基于机械臂的毫米波天线测试系统; 同时, 针对目前平面天线测试系统测试功能单一的问题, 基于机械臂的毫米波天线测试系统, 不仅能够执行平面近场测试, 还能够进行柱面近场、球面近场以及远场测试任务; 通过对机械臂实际的精度测量实验和机械臂关键运动参数的计算, 验证了基于机械臂测量毫米波天线的可行性并为系统软件设计提供了理论基础; 通过与传统平面天线测试系统测试数据比较, 增益偏差 0.73%, 波束宽度偏差 1.4%, 副瓣偏差 1.37%, 测试结果一致性较好; 实际应用表明该系统能够满足毫米波天线的测试需求, 为毫米波天线测试提供了重要手段。

关键词: 毫米波天线; 天线测试; 机械臂; 天线性能; 波瓣图

Design and Realization of Millimeter Wave Antenna Testing System Based on Manipulator

LI Xiaofeng¹, DENG Ye^{1,2}, QIAO Shujun¹, ZENG Xin¹

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China;

2. Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Testing antenna lobe pattern is an important method to analyze antenna performance. With the extensive application of millimeter wave antennas, how to develop a millimeter wave antenna test system with flexible deployment and low cost, it has become a key in the mass production of millimeter wave antennas. To solve this problem, a millimeter wave antenna testing system based on a manipulator is developed. At the same time, in view of the single test function of current planar antenna testing systems, the millimeter antenna testing system based on the manipulator can not only perform the planar near-field test, but also implement the cylindrical near-field test, spherical near-field test, and far-field test. The feasibility of millimeter wave antenna measurement based on the manipulator is verified by the actual precision measurement experiment and the key motion parameter calculation of the manipulator, which provides the theoretical basis for the system software design. Compared with the data of traditional planar antenna testing systems, the gain deviation is 0.73%, the beamwidth deviation is 1.4%, and the sidelobe deviation is 1.37%. Practical applications show that the system can meet the test requirements of millimeter wave antennas, and it provides an important means for millimeter-wave antenna testing.

Keywords: millimeter wave; antenna test; manipulator; antenna performance; lobe pattern

0 引言

随着 5G 移动通信技术、汽车雷达技术、生物技术的飞速发展, 毫米波天线以其信号传输速率快、抗干扰能力强和天线尺寸小等优势正在得到大量应用^[1-4]。精确测量天线参数对于了解天线性能至关重要, 天线性能主要由天线波瓣图体现^[5-6]。目前, 传统平面天线测试系统往往是基于如文献 [7] 和文献 [8] 中安装固定在地面上的扫描架来实现, 成本较高, 无法自由改变位置, 占地空间大, 部署不灵活。测试过程中, 通过移动平面扫描架, 在被测天线的平面近场区域 (源天线与被测天线之间距离小于 $2D^2/\lambda$, 其中, D 为被测天线口径, λ 为天线波长) 测试被测天线的辐射特性, 最后利用快速傅里叶变换运算得到被测天线远场波

瓣图^[7-13], 这种平面天线测试系统只能进行平面近场测试, 无法进行柱面场及球面场的测试, 测试功能单一, 因此具有一定的局限性。

本文实现的基于机械臂毫米波天线测试系统弥补了传统平面天线测试系统的缺陷。通常毫米波的波长在 1 到 10 毫米之间^[14-15], 对于小型化的毫米波天线而言, 根据远场测试距离要求, 即源天线与待测天线之间距离大于 $2D^2/\lambda$, 利用机械臂毫米波天线测试系统在几米范围内即可通过移动机械臂扫描曲面路径, 直接完成毫米波天线远场波瓣图的测量, 能够避免复杂的数学运算。同时, 由于基于机械臂天线测试系统能够自由改变位置, 占地空间小, 部署灵活, 能够快速形成测试生产线, 进行毫米波天线的大批量

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-10-08。

作者简介: 李晓峰 (1989-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 李晓峰, 邓 晔, 乔淑君, 等. 基于机械臂毫米波天线测试系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 21-26, 117.

测试。另外,为了更全面的分析毫米波天线的性能,往往需要测量天线的柱面电磁场与球面电磁场,传统平面扫描天线测试系统已无法更好满足毫米波天线测试需求。综上所述,相较于传统平面天线测试系统,基于机械臂毫米波天线测试系统具有部署灵活,成本低,测试功能多样等多方面优势,为毫米波天线测试提供了重要手段。

1 机械臂控制

机械臂是一种仿生技术的机械装置,本体模仿人的手臂,它由连杆、关节轴和末端执行装置等组成了一个彼此连接和彼此依赖的运动结构。机械臂本体至少有 3 个旋转关节,大多数具有 6 个旋转关节,每个旋转关节表示一个自由度。其中,末端执行装置的空间位置由前 3 个自由度决定,末端执行装置的方向由后 3 个自由度决定。自由度是指机器人所具有的独立坐标轴运动的个数,是机械臂的一个重要的技术指标,它与机械臂的构型有关,能够决定机械臂的运动方式。六自由度机械臂又称为六轴机械臂,是一种柔性技术较高的工业机器人。本文即采用六轴机械臂实现,6 个旋转关节包括基座(关节 1),肩部(关节 2),肘部(关节 3),腕部 1(关节 4),腕部 2(关节 5)和腕部 3(关节 6),基座用于机械臂本体和底座的连接,通过软件编程可以控制各个关节转动,使机械臂末端装置移动到不同位置 and 不同姿态。机械臂以其灵活的运动方式,在汽车装配、高空作业等工业生产方面得到了较多应用。

在研究利用机械臂进行毫米波天线测试过程中,将测试探头安装在机械臂末端装置上,通过控制机械臂末端装置在空间扫描曲面,来测量毫米波天线不同测试位置的幅度和相位大小,从而得到天线的波瓣图。因此,对机械臂的运动学研究是通过软件编程控制机械臂完成相应路径测试的理论基础。

1.1 精度测量

相对于低频天线,测试毫米波天线对测试探头的位置精度要求更高,业内普遍接受的位置精度在 $\lambda/50$ 到 $\lambda/100$ 之间^[16], λ 表示天线波长,例如,40 GHz 频段的毫米波天线测试需要测试探头的精度至少达到 0.15 mm,100 GHz 频段毫米波天线测试甚至要求测试探头的精度要小于 0.06 mm。所以,对机械臂的精度测量十分有必要,决定了机械臂能否直接应用于毫米波天线的测量。机械臂的精度测量分为重复精度测量和定位精度测量。

1.1.1 重复精度测量

重复精度是指在同一位置进行多次测量,多次测量之间的差异范围。重复精度能够反映测量的可重复性,具体测量步骤如下:

1) 机械臂末端朝 X 轴方向运动距离为 X_0 ,然后机械臂原路返回 X_0 ,重复 5 次,每次测量得到的末端 X、Y 坐标与起始点偏离值,测量结果如图 1(a) 所示。

2) 机械臂末端朝 Y 轴方向运动距离为 Y_0 ,然后机械臂原路返回 Y_0 ,重复 5 次,每次测量得到的末端 X、Y 坐标与起始点偏离值,测量结果如图 1(b) 所示。

3) 机械臂末端先朝 X 轴方向运动,再向 Y 轴方向运动,循环 5 次,每次测量得到的末端 X、Y 坐标与起始点偏离值,测量结果如图 1(c) 所示。

4) 机械臂末端朝 Z 轴方向运动距离为 Z_0 ,重复 5 次,每次测量得到的末端 Z 坐标与起始点偏离值,测量结果如图 1(d) 所示。

重复精度测量结果显示,机械臂第一次启动偏离值较大,之后偏离值趋于稳定,即重复性较好。除了第一次启动偏离值较大,X、Y、Z 三轴重复精度均在 0.02 mm 以内,重复精度达到毫米波天线测试要求。

1.1.2 定位精度测量

定位精度指测量结果与真实值之间的误差,定位精度用于衡量位置数据或坐标的准确性。具体测量步骤如下:

1) 机械臂末端朝 X 轴方向以设定步进 50 mm 运动 4 次(Y 轴方向步进默认为 0),每次测量得到的 X、Y 方向实际步进与设定步进偏离值如图 2(a) 所示。

2) 机械臂末端朝 Y 轴方向以设定步进 50 mm 运动 4 次(X 轴方向步进默认为 0),每次测量得到的 X、Y 方向实际步进与设定步进偏离值,测量结果如图 2(b) 所示。

3) 机械臂末端朝 Z 轴方向以设定步进 50 mm 运动 4 次,每次测量得到的 Z 方向实际步进与设定步进偏离值,测量结果如图 2(c) 所示。

定位精度测量结果显示,X、Y、Z 轴方向上步进运动偏离值最大达到 0.2 mm,并且偏离值的方向具有不确定性,多次步进可能会导致偏离值越来越大。因此,需要借助光学辅助系统,在测试过程中,得到测试探头的实际运动位置,然后将计算的理论位置与实际位置做差,得到修正位置,按此方法在测试过程中对测试探头进行实时校准,提高毫米波天线测试系统的测量精度。

1.2 末端位置计算

对于机械臂末端位置的计算难点主要在柱面场和球面场,在平面场中的位置计算不做赘述。

1.2.1 柱面场

如图 3 所示,运动起始点坐标设为 (X_0, Y_0, Z_0) ,圆弧半径为 R ,直径与 Y 轴夹角为 θ ,相邻测试点之间夹角为 β ,在 Z 轴方向上步进为 Z_{step} ,测试点在空间中的位置坐标:

$$X = X_0 + R\sin\theta + R\sin(\beta - \theta) \quad (1)$$

$$Y = Y_0 - R\cos\theta + R\cos(\beta - \theta) \quad (2)$$

$$Z = Z_0 \pm Z_{step} \quad (3)$$

1.2.2 球面场

如图 4 所示,假设运动起始点坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) ,球半径为 R ,组成球体的每个圆弧面之间的夹角为 α ,相邻测试点之间夹角为 β ,故测试点的坐标为:

$$X = X_0 + R\sin\beta\cos\alpha \quad (4)$$

$$Y = Y_0 - R(1 - \cos\beta) \quad (5)$$

$$Z = Z_0 - R\sin\beta\sin\alpha \quad (6)$$

1.3 末端姿态计算

末端姿态计算是机械臂天线测试系统伺服控制的重要一

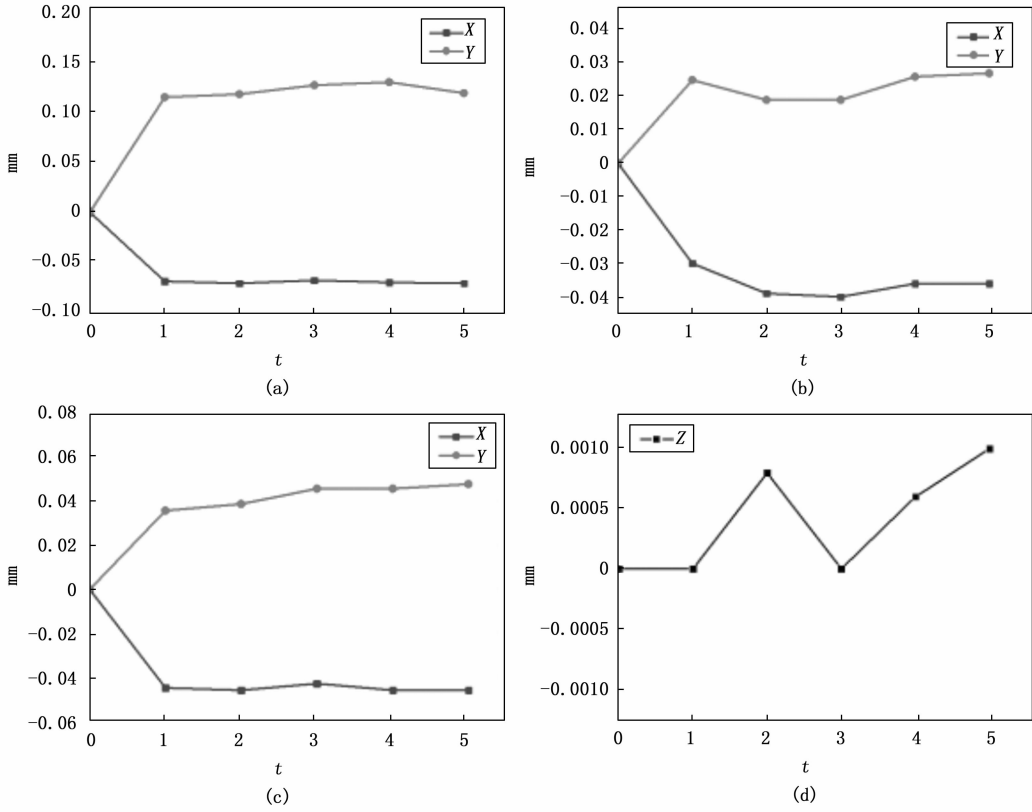


图 1 重复精度测量

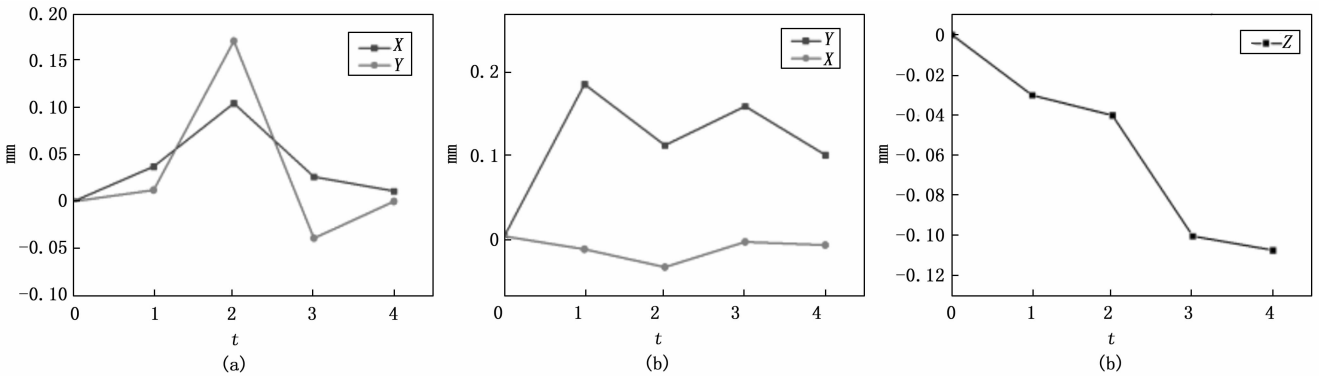


图 2 定位精度测量

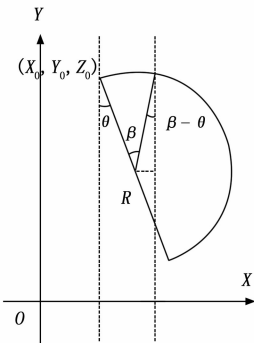


图 3 柱面运动轨迹空间几何图

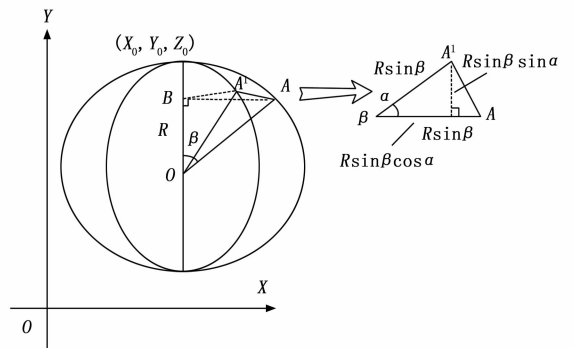


图 4 球面运动轨迹空间几何图

环。区别于平面近场，柱面场和球面场天线测试要求测试探头在空间不同位置实时调整姿态以保证极化方向与待测天线相匹配。姿态的表示方法是机械臂末端坐标系绕着固定的基座坐标系的各轴旋转角度表示，称为 RPY (roll pitch yaw) 角表示法^[17-18]。机械臂末端姿态用 rx, ry, rz 表示，分别表示机械臂末端绕基座坐标系 X 、 Y 、 Z 轴方向的旋转角度。为得到末端坐标系以 X 、 Y 、 Z 轴旋转的变换矩阵，求解如下。

假设末端坐标系为 $\{A\}$ ，基座坐标系为 $\{B\}$ ，矩阵 ${}^B\mathbf{R}$ 表示末端相对于基座坐标系 $\{B\}$ 的方位，用 $\vec{x}_A, \vec{y}_A, \vec{z}_A$ 表示坐标系 $\{A\}$ 中相对于坐标系 $\{B\}$ 的方向余弦矢量。表示如下：

$${}^B\mathbf{R} = (\vec{x}_A, \vec{y}_A, \vec{z}_A)^T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (7)$$

3 个坐标轴矢量 $\vec{x}_A, \vec{y}_A, \vec{z}_A$ 两两相互垂直，且满足 ${}^B\mathbf{R}^{-1} = {}^B\mathbf{R}^T$ ， $|\mathbf{R}| = 1$ 。

故将末端坐标系围绕基座 X 轴旋转 θ 度后，旋转矩阵为：

$$\mathbf{R}(x, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

末端坐标系围绕基座 Y 轴旋转 γ 度后，旋转矩阵为：

$$\mathbf{R}(y, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{pmatrix} \quad (9)$$

末端坐标系围绕基座 Z 轴旋转 η 度后，旋转矩阵为：

$$\mathbf{R}(z, \eta) = \begin{pmatrix} \cos\eta & -\sin\eta & 1 \\ \sin\eta & \cos\eta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

由此可求出机械臂末端坐标系分别绕基座 X 轴、 Y 轴、 Z 轴旋转 θ, γ, η 后的姿态矩阵。

$$\begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos\eta & -\sin\eta & 1 \\ \sin\eta & \cos\eta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中： $\theta = rx, \gamma = ry, \eta = rz$ ，由式 (11) 可得到式 (12) ~ (14)。

$$\frac{a_y}{a_z} = -\tan(rx) \quad (12)$$

$$a_x = \sin(ry) \quad (13)$$

$$\frac{o_x}{n_x} = -\tan(rz) \quad (14)$$

通过反三角函数，即可得到机械臂末端姿态。

根据以上运算得到机械臂的末端位置和姿态，从而得到机械臂的末端位置和姿态的旋转矩阵 \mathbf{T} ，令机械臂 6 个关

节的角度矩阵分别为 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4, \mathbf{A}_5$ 和 \mathbf{A}_6 。按照通用的机械领域的 \mathbf{DH} 矩阵，有公式 (15)：

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}_1 * \mathbf{A}_2 * \mathbf{A}_3 * \mathbf{A}_4 * \mathbf{A}_5 * \mathbf{A}_6 \quad (15)$$

将机械臂 6 个关节角度分为 2 组，先使用几何法计算基座关节角度 (关节 1 角度)、肩部关节角度 (关节 2 角度) 和肘部关节角度 (关节 3 角度)，因为这 3 个角度可在不涉及 3 个腕部关节 (关节 4、5、6) 的情况下进行求解。基座关节角度主要控制机械臂整体的旋转，可投影到 XOY 坐标系进行计算，肘部关节角度和肘部关节角度与机械臂整体旋转无关，可投影到坐标系 XOZ 或者 YOZ 进行计算。完成角度基座关节角度、肩部关节角度和肘部关节角度计算后，将其结果代入公式 (15) 中得到：

$$\mathbf{A}_4 * \mathbf{A}_5 * \mathbf{A}_6 = \mathbf{T} * \mathbf{A}_1^{-1} * \mathbf{A}_2^{-1} * \mathbf{A}_3^{-1} (16)$$

根据公式 (16) 比较两边矩阵内部的各元素，获取一边为常数，另一边为单个未知数的 3 个元素，通过求解该单一未知数分别得到 3 个腕部关节的角度信息。此过程获得的解可能并不唯一，需要对所获得的解进行筛选，得到在机械臂实际的运动范围内的解，最后通过路径最短原则，得到最优的各个关节角度。

将以上方法求解的 6 个关节角度通过编写的上位机软件通过网络发送到伺服控制系统，再由伺服控制系统来控制机械臂 6 个关节达到相应的角度，从而控制机械臂实现预设的位置和姿态进行运动，辅助完成每个测试位置的测试。

2 机械臂毫米波天线测试系统设计

2.1 系统设计

机械臂毫米波天线测试系统硬件主要由主控计算机、矢量网络分析仪、伺服控制系统、机械臂、波束控制系统、光学辅助系统、电特性已知的标准增益探头及网络交换机等组成。主控计算机采用 UDP/IP 协议以组播方式与其他硬件设备进行数据通信，通过编写的上位机软件，主要完成对机械臂运动速度、加速度、位置、姿态等状态的控制，以及控制矢量网络分析仪发射射频信号并完成信号采集，最终实现测试数据的记录、处理、显示等功能。矢量网络分析仪通过提供射频信号，完成射频回路幅频特性和相频特性的测量。

本文采用的六轴机械臂的 6 个关节都装有步进电机，步进电机具有与伺服控制系统良好的接口性能，具有步距细分功能。步进电机通过闭环控制的方式，能够对电机进行精细化调节，伺服控制系统通过测量 6 个轴电机的运动状态和输出信号，对各个轴进行反馈控制，能达到较高的控制精度。伺服控制系统能够对主控计算机发送的指令进行解析，形成机械臂扫描系统及硬件可识别的控制信号，然后控制机械臂的 6 个电机驱动各个关节运动到相应的角度，保证测试探头按照所设置的方式进行扫描运动，从而完成机械臂的多轴控制、数据交互等功能。

机械手臂用于携带电特性已知的标准增益探头完成指定的轨迹运动，协助完成在各个空间测试位置的幅度和相

位测试。波束控制系统通过控制待测天线上的移相器和衰减器来完成不同频点、方位和俯仰的波束控制, 形成不同的波瓣图。

光学补偿系统, 包括一台计算机和光学测距设备, 计算机主要用于接收来自主控计算机的机械臂运动参数, 如起始位置、运动半径、圆弧个数和圆弧之间的夹角等参数, 并根据接收的机械臂运动参数运算出当前测试轨迹的每个测试位置点的坐标, 在天线测试过程中, 光学测距设备实时测量测试探头的空间位置并通过网络反馈给主控计算机, 主控计算机根据光学辅助系统反馈的位置和计算得到的理论测试点的位置得到机械臂运动位置误差, 将此误差信息反馈给伺服控制系统, 从而控制测试探头到达理想位置, 完成对测试位置的校准功能。光学辅助系统主要为了弥补机械臂测试毫米波天线时定位精度不够的缺陷, 用于毫米波天线在高频特性测试过程中系统位置校准功能, 提高基于机械臂毫米波天线测试系统的精度。

测试流程如图 5 所示, 测试开始, 先进行各个硬件设备系统初始化, 若系统初始化通过后, 通过上位机软件设置机械臂的运动参数, 包括测试起点、运动速度、步进间隔等参数, 设置矢量网络分析仪参数, 包括频率、频点数、中频带宽、S 参数等。设置完成后, 开始控制机械臂进行移动, 光学辅助系统实时测量机械臂的空间坐标, 待机械臂的实际位置与预先设置的位置相同时, 机械臂到达测试点, 机械臂停下后, 通过波束控制系统控制天线的频点、方位和俯仰等切换天线波束, 然后矢量网络分析仪进行数据采集, 上位机软件将数据进行显示并记录, 当前测试点测试完毕后, 重复上个测试点的测试流程, 直至完成所有测试点的测试。

整个系统原理框图如图 6 所示, 在毫米波天线接收波瓣图测试时, 矢量网络分析仪通过端口 1 发送射频信号经射频电缆到达位于安装在机械臂末端的测试探头, 待测天线接收探头辐射出来的信号并通过射频电缆将信号送至矢量网络分析仪端口 2, 从而测得天线在接收状态下的幅度和相位数据。在毫米波天线发射波瓣图测试时, 矢量网络分析仪通过端口 2 发送射频信号经射频电缆到待测天线, 探头接收待测天线向空间辐射的信号经射频电缆送到矢量网络分析仪的端口 1, 从而得到天线在发射状态下的幅度和相位数据。测试过程中, 机械臂伺服控制系统同步接收主控计算机的控制指令, 控制机械臂各个关节运动使测试探头达到指定的测试位置, 得到不同位置待测天线的幅度值和相位值, 通过计算最终得到待测天线的波瓣图。系统实测场景如图 7 所示。

2.2 软件设计

机械臂毫米波天线测试系统软件是整个系统最终的功能体现, 是系统开发的关键。软件采用 Qt 开发, 具有优良的跨平台特性^[19], 并且 Qt 良好的封装机制使得 Qt 的模块化程度非常高, 可重用性较好。

考虑到测试系统的通用性和可扩展性, 本系统软件采

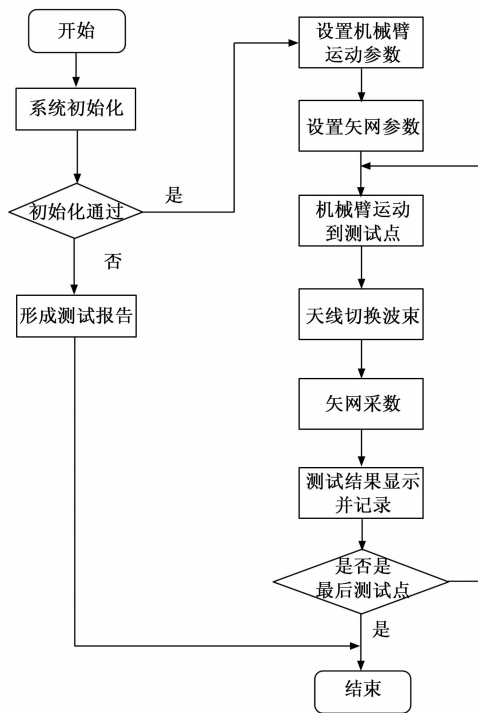


图 5 机械臂毫米波天线测试系统测试流程图

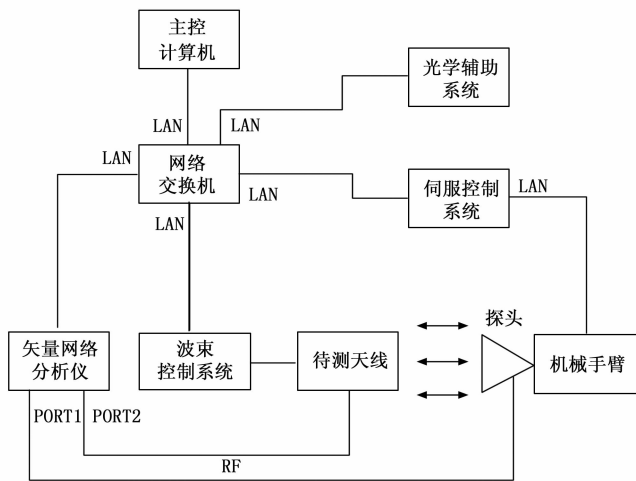


图 6 机械臂毫米波天线测试系统框图

用构件化、模块化的设计思想。软件架构如图 8 所示, 人机接口集成了软件的各个功能模块, 能够对测试参数进行配置以及对测试结果与测试位置进行显示。数据服务实现对测试结果解析、分析和存储。控制接口与驱动程序将测试系统软件与硬件资源进行关联, 实现测试系统软件的底层调度。构件库是软件构件化开发的基础^[20], 构件库主要包含运动学欧拉角转四元素、四元素转欧拉角、坐标系设置、机械臂关节角正解得到末端位置与姿态、机械臂末端位置与姿态逆解得到关节角等, 用户可以根据测试系统的不同需求, 通过构件管理工具, 对构件进行裁剪或添加, 达到功能扩展的目的。执行引擎通过对构件进行动态调用,



图 7 机械臂毫米波天线测试系统场景图

实现相应的测试功能。

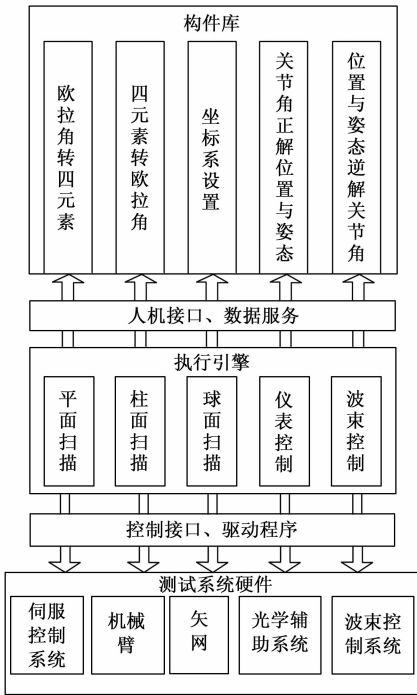


图 8 机械臂毫米波天线测试系统软件架构框图

软件通过友好的界面与用户进行交互，软件界面主要包括 5 个功能模块，分别为机械臂单控调整模块、球面场测试模块、柱面场测试模块、平面场测试模块、数据采集与显示模块。

机械臂单控调整模块能够在测试开始前对机械臂的姿态和位置进行适度调整，并能够一键恢复姿态、移动到起始位置及完成机械臂初始化。

平面场扫描测试有 X 轴垂直单向、X 轴垂直双向、Y 轴垂直单向、Y 轴垂直双向等 4 种测试模式，平面扫描测试模块可以完成测试起始点、测试模式、X 轴和 Y 轴方向上测试位置之间的距离以及测试点数的设置。

圆柱面扫描测试分为 XOY 面、XOZ 面以及 YOZ 面等 3 种扫描方式，圆柱面测试模块能够实现测试起始点、圆弧半径、圆弧个数、圆弧之间的间隔以及每个测试位置之间的弧度等参数的设置。

球面测试模块能够完成测试起点、球半径、各个圆弧之间的夹角和圆弧上各测试点的弧度等参数的设置。运动轨迹设置界面如图 9 所示。

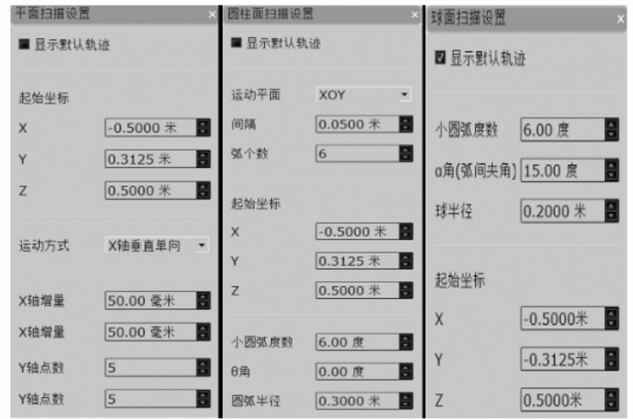


图 9 运动轨迹设置界面

数据采集与显示模块能够在测试过程中完成测试数据的采集，并显示当前测试点的幅度和相位信息，同时通过捕捉机械臂末端的位置移动，将测试位置显示在空间坐标系上。通过多线程技术，将机械臂末端的位置与姿态实时显示在界面上。数据采集显示模块界面图 10 所示。

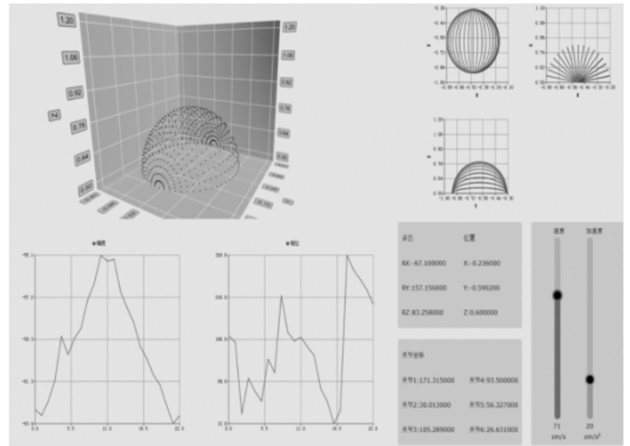


图 10 数据采集与显示模块界面

3 实验结果与分析

本文中基于机械臂毫米波天线测试系统已经应用于多个型号的毫米波天线测试中，能够精确完成毫米波天线的测试任务。

以平面近场测试为例，利用基于机械臂毫米波天线测试系统和传统平面天线测试系统在相同的测试环境中，分别对某型号毫米波天线在 31 GHz 频点下进行测试，两种测试系统测试结果的波瓣图如图 11 所示，其中实线是基于机械臂毫米波天线测试系统的测试结果，虚线是传统平面天线测试系统的测试结果。具体测试数据比对如表 1 所示。

(下转第 117 页)