

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416191

多波位测量通用波控分机研究与应用*

李丹丹

(清华大学电子工程系电磁实验中心 北京 100084)

摘要: 相控阵天线暗室测量在相控阵天线研制中起着重要作用。在暗室测量中,为了解决相控阵天线测量内容多、效率低、精度低、系统普适性差、成本高的问题,本文设计出一款通用波控分机,通过硬件设计,预留多种通信接口,固定接口协议,适用多类相控阵天线;通过软件编程,精确测量脉冲、波束切换时间,匹配暗室测量系统,应用到平面近场暗室、紧缩场暗室测量中,并给出测试流程及时序图。实验结果分析表明,多波位与单波位测量方向图扫描精度基本一致,测试效率显著提升,降低测量成本。通用波控分机的应用,实现不同类型多波位相控阵天线在微波暗室中快速、准确的测量。

关键词: 暗室;相控阵天线;多波位;波控分机

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Research and application of universal wave control machine for multi-beam measurement

Li Dandan

(Electromagnetic Experimental Center, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Microwave laboratory measurement of phased array antenna plays an important role in the development of phased array antenna. In the microwave laboratory measurement, in order to solve the problems of phased array antenna measurement content, low efficiency, low precision, poor system universality and high cost, this paper designed a general wave control extension, through hardware design, reserve a variety of communication interfaces, fixed interface protocols, suitable for multi-class phased array antennas. Through software programming, the pulse and beam switching time are accurately measured, and the microwave laboratory measuring system is matched to the plane near-field darkroom and tight field darkroom. The test process and sequence diagram are given. The experimental results show that the scanning accuracy of multi-wave position and single-wave position measurement pattern is basically the same, the test efficiency is significantly improved, and the measurement cost is reduced. Rapid and accurate measurement of different types of multi-wave phased array antennas in the microwave laboratory is realized by the application of general wave controller. In the microwave laboratory measurement, in order to solve the problems of phased array antenna measurement content, low efficiency, low precision, poor system universality and high cost, this paper designed a general wave control extension, through hardware design, reserve a variety of communication interfaces, fixed interface protocols, suitable for multi-class phased array antennas. Through software programming, the pulse and beam switching time are accurately measured, and the microwave laboratory measuring system is matched to the plane near-field darkroom and tight field darkroom. The test process and sequence diagram are given. The experimental results show that the scanning accuracy of multi-wave position and single-wave position measurement pattern is basically the same, the test efficiency is significantly improved, and the measurement cost is reduced. With the application of general wave controller, different types of multi-wave phased array antennas can be measured quickly and accurately in the microwave laboratory.

Keywords: microwave laboratory; phased array antenna; multiple-beam; wave control extension

0 引言

随着通信技术的快速发展^[1],高性能相控阵天线不仅

应用到军事雷达中,而且在民企中得到广泛应用,例如新兴智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)天线等,能够快速操控天线的相位、幅度等参数。对该类天线的

收稿日期:2024-06-06

* 基金项目:清华大学实验室创新基金(53100800323)项目资助

测量精度、效率要求也越来越高,这也对相控阵天线的测量带来了挑战。微波暗室做为相控阵天线性能指标验证的重要场地,呈现出测试频点多、波位多、波位状态切换频繁等特点^[2]。传统的测量方法无法满足相控阵天线测量需求。单波位测量方法虽然能够实现相控阵天线多波位测量,但测试效率极低,并且人为切换不同波位的过程中,会带来诸多误差。在测试时间和测试成本上消耗很大,影响研发和生产进度。开展对相控阵天线快速、准确测量的研究非常重要^[3]。

当前在多波位天线高效测量系统研究中^[4],表现出测量系统专用性太强,只针对某一种天线,无法满足多波位天线测试的普适性^[5];应用测试平台参差不齐;多波位测量精度低等问题^[6]。为解决以上测量问题,满足多类天线多波位测试需求,本文基于平面近场暗室、紧缩场暗室测量系统,先对现有天线测量系统软件进行软件优化^[7],通信接口匹配。然后通过硬件、软件设计,研制一套通用波控分机,其做为暗室测量系统与被测天线的一个桥梁,连接各类型天线,形成一套完整的多波位暗室测量系统。建立多功能微波暗室,为多波位天线的研发和生产提供更高效广泛的服务。

利用 C 波段 RIS 天线分别在两个暗室中进行多波位和单波位测量对比实验,测量数据分析表明,两个暗室单、多波位测量结果误差较小。平面近场多波位测量, N 波位天线测量效率约为单波位的 0.75 N 倍;紧缩场多波位测量系统随着波位数的增加,测试效率成倍提高。当前暗室测量,对天线波束宽度、副瓣大小均没限制,800 MHz ~ 40 GHz 频段,口径 ≤ 2.4 m 内的各类相控阵天线测量应用性较强。

1 波控分机设计原理

为满足多波位相控阵天线测量需求,基于微波暗室测量系统,对其进行软件及接口优化^[8]。通过硬件与软件设计^[9],研制一套通用波控分机系统,应用到平面近场和紧缩场微波暗室测量系统中。

1.1 硬件设计

波控分机整体结构如图 1 所示,内部由主控板和 TTL-422 转接板组成。主控板硬件设计以单片机 STM32F407VET6 为主控制芯片,基于 Cortex-M4 内核、扩展 1 路 RS232 接口,1 路 RS485 接口,2 路 CAN 接口,1 路以太网接口,MSB 接口,如图 2 所示,适用多类相控阵天线通信接口。TTL-422 转接板选用 MAX3490ESA 通信芯片,最大通信速率 10 Mbps,3.3~5 V 供电。波控分机基于高性能、低功耗、多接口等特性,满足各类相控阵天线多波位测量需求。

波控分机通过 RS-485/RS-422 串口数据总线发送、接收天线波控系统信息^[10],波控分机通过网口、串口连接暗室测量控制系统,传输波控协议和硬触发信号。

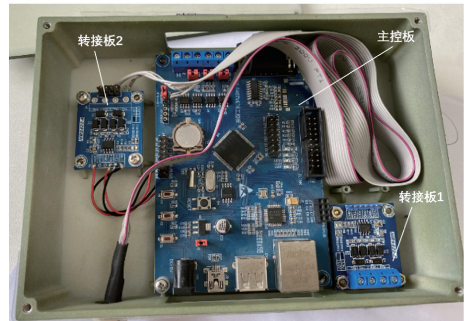


图 1 波控分机整体结构

Fig. 1 structure of the wave control machine

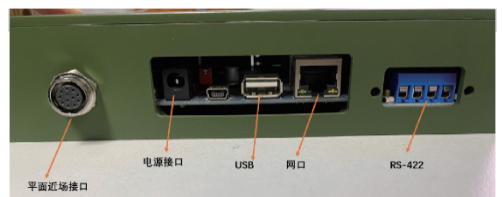
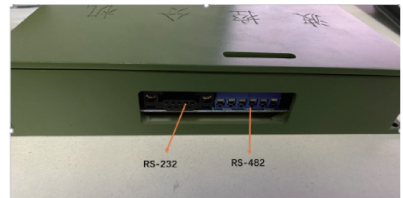


图 2 波控分机接口

Fig. 2 Interface of the wave control machine

1.2 软件设计

波控分机软件流程如图 3 所示^[11]。上位机输入波位、列表、方向信息,通过网口或者串口发送 TCP 协议给波控分机;波控分机接收后将波位编码转换成对应的波束赋形指令,波控分机发送给天线波控系统,相控阵天线切换完成后反馈给控制器,控制器发出脉冲触发矢网开始测量,波位重复切换,直至测量点完成。

多波位相控阵天线测量中,时间做为重要的指标参数。矢量网络分析仪、扫描架、转台等设备响应时间均为 ms 级^[12],波控分机系统波束切换时间为 μs 级,能够分别满足两个暗室测量系统需求。

待测天线系统由天线阵面、波控板、波控分机组成。波

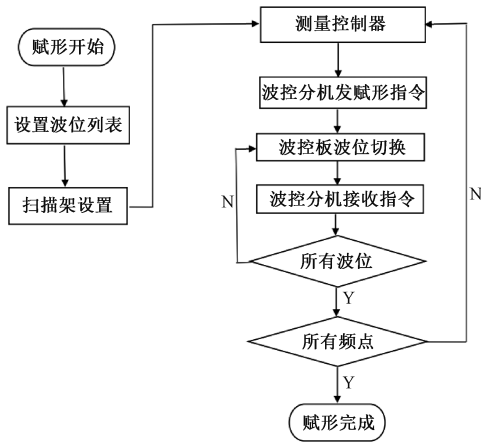


图 3 波控分机软件流程图

Fig. 3 Software flow diagram of the wave control machine

位切换时间如图 4 所示,波控分机数据发送时间 $200\ \mu\text{s}$,波控板波位切换时间 $100\ \mu\text{s}$,波控板信息回传 $100\ \mu\text{s}$,系统波位切换时间: $200+100+100=400\ \mu\text{s}$ 。根据切换时间测量计算,在平面近场和紧缩场多波位测量系统中,预留波位切换时间大于 $400\ \mu\text{s}$,微波暗室可以准确测量多波位天线。

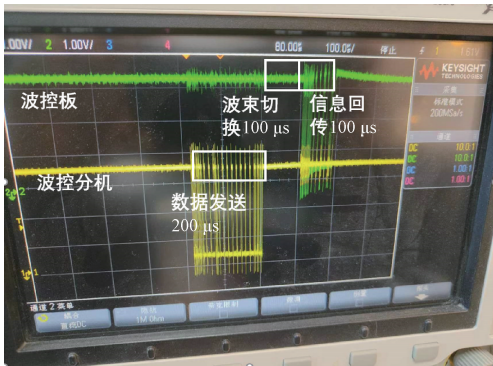


图 4 波位切换时间

Fig. 4 Switching time of beam

2 波控分机测量应用

平面近场和紧缩场暗室测试对象上兼顾民用与军用各类高、低增益天线。可测量天线方向图、增益、波束指向、副瓣、零点、3 dB 带宽等参数。

2.1 平面近场暗室应用

平面近场测量是利用探头天线来测量被测天线口径上近场的幅度和相位,根据电磁场平面波展开理论^[13],计算出天线的辐射远场,从而获取相控阵天线的辐射特征参数。波控分机应用到该系统中,设置上位机参数,扫描架扫描一个设置平面,可获得多波位天线测量结果。

平面近场多波位测量系统框图如图 5 所示,波控分机与相控阵天线串口通信做为发射,矢量网络分析仪产生射频信号,为待测天线提供射频激励,探头接收信号后进入矢量网络分析仪进行幅相测试。实时控制器 (real-time

controller,RTC)为系统控制核心,计算机通过局域网(local area network,LAN)与 RTC 相连,进行指令通信;TTL 为位置触发信号,控制各个设备、仪表、被测件的时序关系,实现波位、频点、通道的有序切换,高效准确地完成平面近场多波束测量。

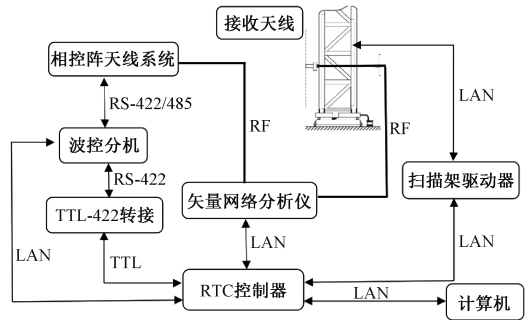


图 5 平面近场多波位测量系统框图

Fig. 5 Block diagram of the multi-beam measurement planar near-field

测试流程如下:1)架设好被测天线如图 6 所示;2)上位机设置天线测量参数如图 7 所示;3)扫描天线阵面,获得近场测试数据;4)通过数据分析软件转换成远场数据。

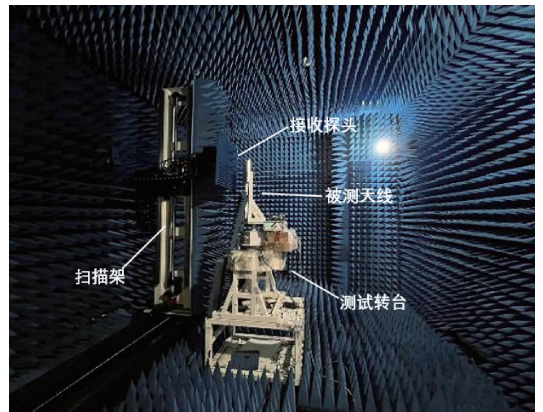


图 6 平面近场暗室测量系统

Fig. 6 Measurement system of the planar near-field



图 7 平面近场多波位测试界面

Fig. 7 Multi-beam test interface of the planar near-field

在近场测量中,上位机通过 RS-422 串口与波控分机通信。时序分析如图 8 所示。SCN_RTC 代表扫描架一个采样点的定位脉冲(探头到达一个位置),一个 SCN 信号即完

成一个 SUB_RAY 的时序控制;SWC 代表多通道开关,BC 代表波控分机,PNA 代表矢网。当探头到达第一采样点,通道 1 给出响应脉冲;RTC 给波控分机一个高电平脉冲,波控分机识别高电平后切换波位,切换完成后电平拉高;RTC 检测到波控高电平发矢网一个脉冲,矢网收到脉冲后开始采集数据;直至测试完成所有的波束、频点、通道。

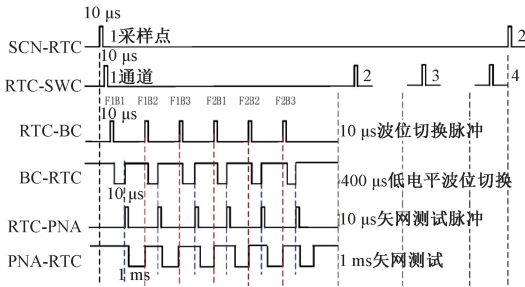


图 8 平面近场多波位测量时序图

Fig. 8 Multi-beam timing diagram of the planar near-field

当 F (频点) = 3, N (通道) = 1, B (波位) = 6; 扫描步距 25 mm; 扫描面 $1\ 250 \times 1\ 250$ mm; 扫描架速度 $V = 100$ mm/s; 根据时序图计算可得: $t = 0.01 + 0.4 + 0.01 + 1.5 + 1 = 2.92$ ms; $T = (t \times B \times F + 0.01) \times N = 2.92 \times 18 + 0.01 = 52.57$ ms; $T_{\text{总}} = (52.57 + 250) \times 2\ 500 = 75\ 642.5$ ms = 12.61 min; $T_{\text{实}} = 12.7$ min。可实现多波位测量时间计算。

平面近场测量系统具备多通道、多频点、多波位测试功能,假设一次完整测试过程中,采样点数为 $M \times N$,完成整个平面测试数据采集软件流程如图 9 所示。

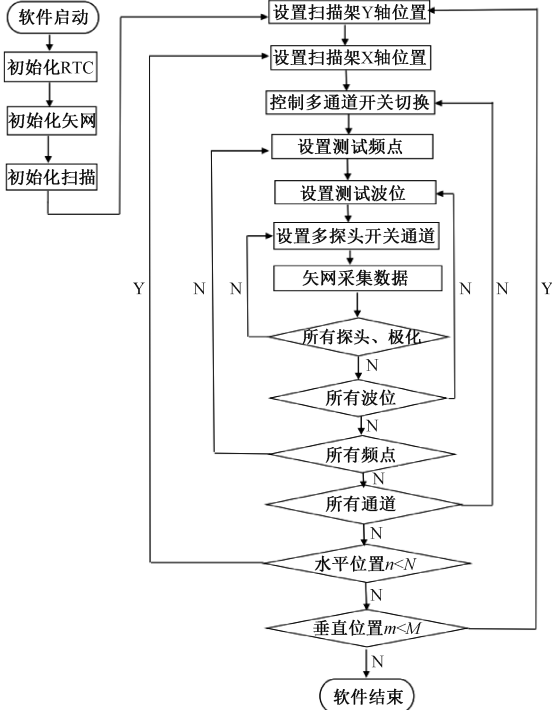


图 9 平面近场测量软件流程图

Fig. 9 Software flow diagram of the planar near-field

2.2 紧缩场暗室应用

紧缩场利用精密的反射面,将源产生的球面波在近距离内转换成平面波,在有限的测试距离上,得到天线远场的直接测量方法^[14]。波控分机应用到紧缩场测量系统中,转台转动一次,可实现多波位天线参数的快速测量^[15]。

紧缩场多波位测量系统框图如图 10 所示,矢量网络分析仪产生射频信号,通过射频线缆发送给馈源天线,相控阵天线系统与波控分机串口通信,转台控制天线的位置。各设备通过网络交换机相连,局域网(LAN)将控制计算机与转台控制系统、馈源控制系统、矢量网络分析仪、波控分机、被测天线互连,进行实时联动控制,完成紧缩场多波位天线测量。

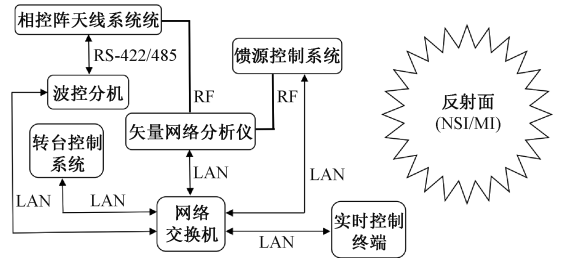


图 10 紧缩场多波位测量系统框图

Fig. 10 Block diagram of the multi-beam measurement compact field

测试流程如下:1)被测件固定到转台上如图 11 所示;2)设置测试频点和波束参数如图 12 所示;3)转动转台测量角度,获取多波位天线远场方向图;4)数据处理软件处理数据。

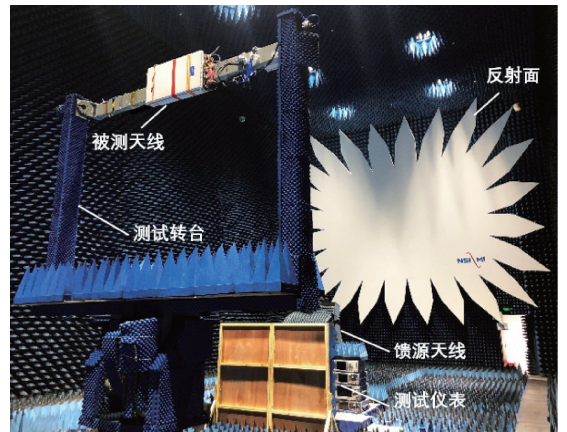


图 11 紧缩场测量系统

Fig. 11 Measurement system of the compact field

紧缩场测量系统中,上位机与波控分机通过网口通信^[16]。时序分析如图 13 所示。转台到达初始位置,ZT_P 给出 P1 位置脉冲,根据转台步进速度,到达 P1 测试点需 2 000 ms,转台驻留时间(T_{z_s})50 ms;然后波控系统(BC)切换波位 B1,需 2~3 ms,波位驻留时间(T_{b_s})150 ms;最后矢网(VNA)采集数据,每个频点采集时间 28 ms;遍历完所有波位和频点后,待定时器识别是否测完, (T_{timer})约



图 12 紧缩场多波位测量界面

Fig. 12 Multi-beam test interface of the compact field

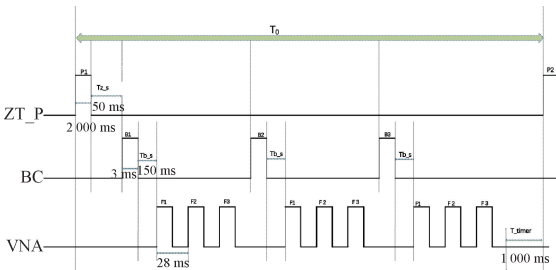


图 13 紧缩场多波位测量时序图

Fig. 13 Multi-beam timing diagram of the compact field

为 600~1 000 ms 后转台到 P2 位置,重复测试。

当 $F=3, B=5; V=2^\circ/s$; 测量角度范围 160° ; 根据时序图可计算: $T_{b_s}=150\text{ ms}; T_{timer}\approx 800\text{ ms}; T_0=2\ 000+(3+T_{b_s}+40\times F)\times B+800\approx 4\ 035\text{ ms}; T_{总}=T_0\times 161-2\ 050=588\ 015\text{ ms}\approx 10.8\text{ min}; T_{实}=10.6\text{ min}$ 。

由于在 $F\times B$ 数值不定的测试条件下, $T_{timer}\approx 600\sim 1\ 000\text{ ms}$, 即测量时间可以近似计算。

紧缩场多波位、多频点测试中, 测量角度范围 D_s , 则完成整个测试数据采集软件流程如图 14 所示^[17]。

3 测量数据分析

3.1 效率分析

C 波段天线在平面近场测量设置: $V=100\text{ mm/s}, X\times Y=1\ 250\times 1\ 250\text{ mm}, F=3, B=1, 6, 12, 20$, 多波位测量时矢网设置 1.5 ms 延时。多、单波位测量时间曲线如图 15 所示, 当 $B\times F$ 值 $\leq 85, N$ 个波位天线测量效率约为单波位测量的 0.75 N 倍。

紧缩场测量实验设置 $V=2^\circ/s$, 扫描范围 160° , 多波位测量时设置转台驻留时间 150 ms, $F=3, B=1, 5, 10, 20$ 时。多、单波位测量时间曲线如图 16 所示, 紧缩场多波位测量随着波位数的增加, 测试效率成倍提高。

3.2 精度分析

C 波段天线波位 $0^\circ, -30^\circ, 30^\circ, -45^\circ, 45^\circ$ 时, 在平面近场暗室做多、单波位比对测量, 测量数据具体如表 1 所

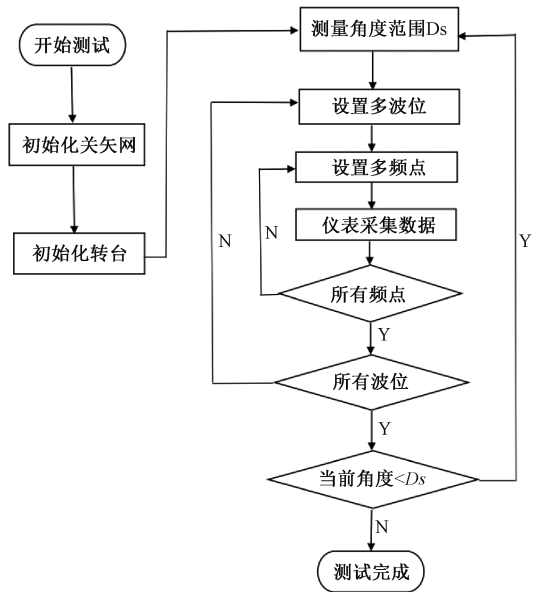


图 14 紧缩场测量软件流程图

Fig. 14 Software flow diagram of the compact field

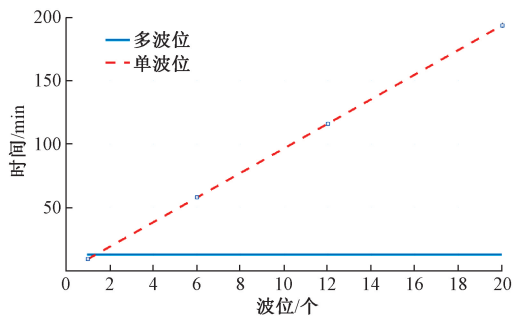


图 15 平面近场多、单波位测量时间对比

Fig. 15 Comparison of measuring time of multiple-single beam in planar near-field

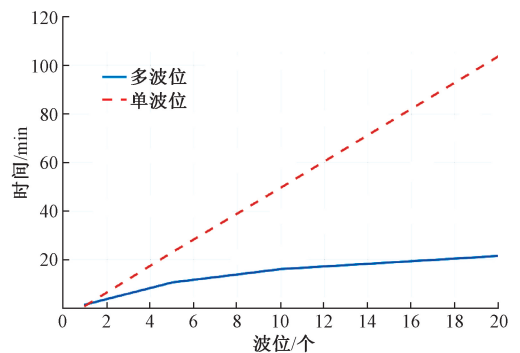


图 16 紧缩场多、单波位测量时间对比

Fig. 16 Comparison of measuring time of multiple-single beam in compact field

示, 峰值最大差值 0.11 dB, 最小差值 0.07 dB; 波位最大偏移 0.12°, 最小偏移 0.01°; 3 dB 波宽最大差值 0.11°, 最小差值 0.02°。单、多波位测量数据一致性较好。方向图

如图 17(a)所示,各波位指向准确。如图 17(b)、(c)所示,单、多波位方向图主瓣和近旁瓣基本重合。满足天线平面近场测量要求。

C 波段天线波位 0° 、 -30° 、 60° 、 -30° 、 -60° 时,在紧缩场暗室做多、单波位比对测量,测量数据具体如表 2 所示,峰值最大差值 0.13 dB,最小差值 0 dB;最大偏移 0.17°;最小偏移 0.06°;3 dB 波宽最大差值 0.31°,最小差值 0.02°。单、多波位测量数据一致性较好。如图 18(a)所示,各波位方向图指向准确。如图 18(b)、(c)所示,测量各角度方向图高度重合。满足天线紧缩场测量要求。

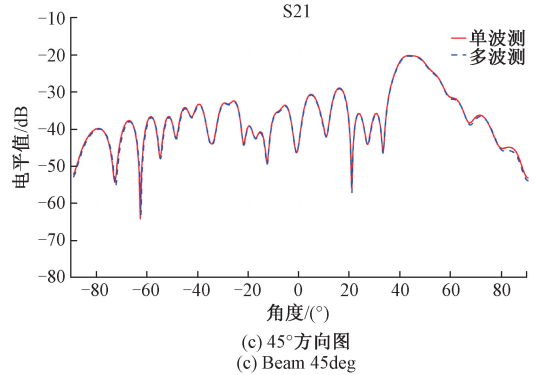
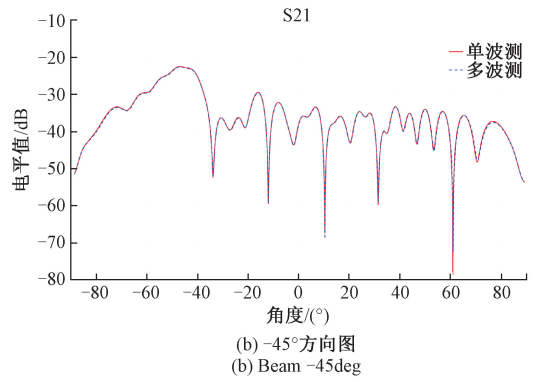
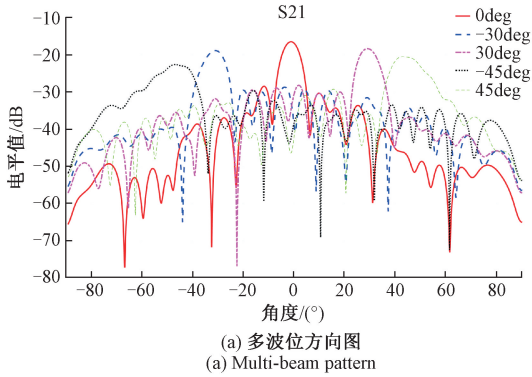


图 17 平面近测量方向图

Fig. 17 Pattern of the planar near-field

表 1 平面近场多、单波位测试数据

Table 1 Test data multiple-single beam of the planar near-field

波位/ deg	峰值/dB			偏移角度/(°)			3 dB 宽度/(°)		
	单波位	多波位	差值	单波位	多波位	差值	单波位	多波位	差值
0	-16.41	-16.52	0.11	-2.52	-2.54	0.02	6.71	6.73	-0.02
-30	-18.74	-18.81	0.07	-32.62	-32.74	0.12	7.82	7.91	-0.09
30	-18.24	-18.32	0.08	27.44	27.43	0.01	7.89	7.86	0.03
-45	-22.52	-22.61	0.09	-48.63	-48.65	0.02	12.67	12.60	0.07
45	-20.41	-20.51	0.10	41.11	41.23	-0.12	12.47	12.36	0.11

表 2 紧缩场多、单波位测试数据

Table 2 Test data multiple-single beam of the compact field

波位/ deg	峰值/dB			偏移角度/(°)			3 dB 宽度/(°)		
	单波位	多波位	差值	单波位	多波位	差值	单波位	多波位	差值
0	-23.12	-23.15	0.03	-1.55	-1.61	0.06	6.74	6.72	0.02
-30	-24.52	-24.52	0.00	-31.93	-32.01	0.08	7.52	7.40	0.12
-60	-27.39	-27.45	0.06	-63.74	-63.88	0.14	13.58	13.63	-0.05
30	-24.33	-24.42	0.09	29.00	28.83	0.17	7.46	7.62	-0.16
60	-27.58	-27.45	-0.13	60.01	59.86	0.15	13.56	13.25	0.31

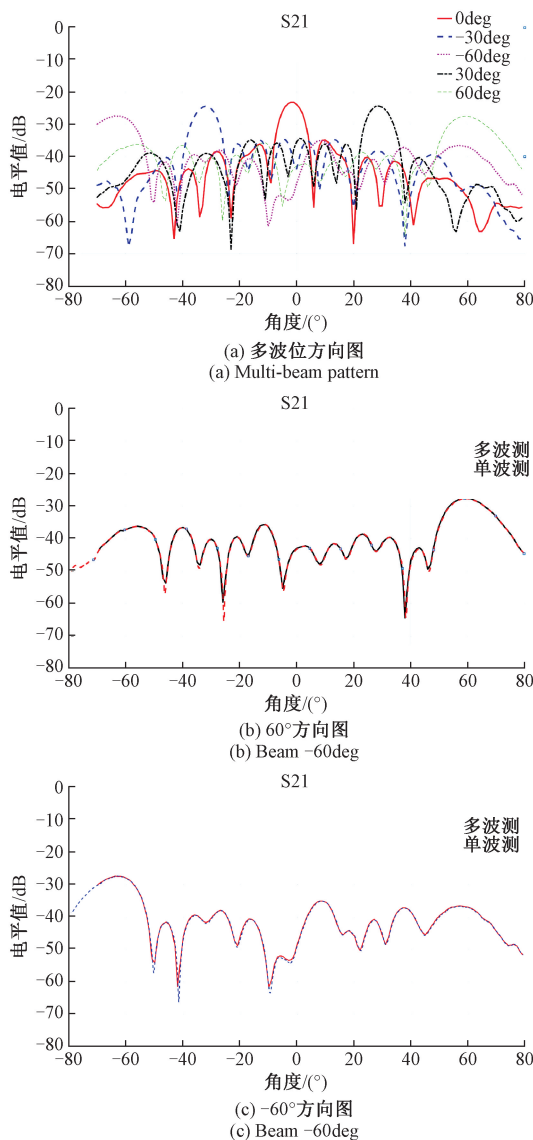


图 18 紧缩场测量方向图

Fig. 18 Pattern of the compact field

4 结 论

根据多波位相控阵天线的测量需求,分析测量系统原理^[18],设计波控分机样机,应用到平面近场和紧缩场暗室测量中。各类相控阵天线适配波控分机的通信协议和接口后,即可进行多波位测量。测量数据显示,多波位测量数据精度高,测试效率显著提高。能够实现各类相控阵天线高效测量。

下一步主要针对测量软件、仪表采数方面进行优化,更进一步提高暗室测量系统的测试性能。

参考文献

[1] 金东勇,陈俊霞,李艳华. 平相控阵天线波束控制技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(1):

75-79.

JIN D Y, CHEN J X, LI Y H. Beam control technique of flat phased array antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(1):75-79.

- [2] 乔兴旺,陶成忠,王春艳. 一种相控阵天线自动化测试系统[J]. 电子技术与软件, 2021(12):105-106.
QIAO X W, TAO CH ZH, WANG CH Y. An automatic test system for phased array antenna[J]. Electronic Technology and Software, 2021(12): 105-106.
- [3] 郑楷,耿江东,杨士义. 一种高效率相控阵天线自动测试系统[J]. 测控技术, 2015, 34(S0):357-360.
ZHENG K, GENG J D, YANG SH Y. An automatic test system for phased array antenna with high efficiency[J]. Observation and Control Technology, 2015, 34(S0):357-360.
- [4] 李灏,周朝阳. 多波束比幅系统测向校准方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(1):110-115.
LI H, ZHOU ZH Y. Direction finding calibration method for multi-beam ratio system [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(1):110-115.
- [5] 龙永刚. 多波束多波位相控阵自动测试系统设计[J]. 空军预警学院学报, 2021, 35(5):324-327.
LONG Y G. Design of multi-beam and multi-wave phased array automatic test system[J] Journal of the Air Force Early Warning Academy, 2021, 35(5): 324-327.
- [6] 胡洲. 天线批测伺服控制系统的设计与实现[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
HU ZH. Design and implementation of antenna batch test servo control system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [7] 金东勇,陈俊霞,李艳华. 平面相控阵天线波束控制技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(1):75-79.
JIN D Y, CHEN J X, LI Y H. Beam control technique of planar phased array antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(1):75-79.
- [8] YANG G W, LI J Y, WEI D J, et al. Study on wide-angle scanning linear phased array antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2017, 66(1): 450-455.
- [9] 陈霄. 外场天线测试系统的数据处理及软件设计[D]. 成都:电子科技大学, 2016.
CHEN X. Data processing and software design of external field antenna test system [D]. Chengdu:

- University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [10] MIURA A, ORIKASA T, AKIOKA M, et al. Summary and R&D status of satellite antenna footprint measurement system[J]. IEICE Technical Report, 2015, 115(164): 39-44.
- [11] 胥志毅. 基于嵌入式 ARM 的雷达波控控制系统[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- XU ZH Y. Radar wave control system based on embedded ARM[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [12] GAO H, FAN W, WANG W, et al. On uncertainty investigation of mmwave phased-array element control with an all-on method [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(11): 1993-1997.
- [13] GAO H Q, WANG W M, WU Y L, et al. Experimental comparison of on-off and all-on calibration modes for beam-steering performance of mmWave phased array antenna-in-package[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.
- [14] 钟洋, 卢刚, 王伟豪. 基于紧缩场暗室的相控阵天线快速测试系统设计研究[J]. 实验研究, 2022, 30(23): 87-90, 75.
- ZHONG Y, LU G, WANG W H. Design and research of rapid test system for phased array antenna based on tight field darkroom [J]. Experimentation Research, 2022, 30(23): 87-90, 75.
- [15] 丁若梁, 阎云涛, 陈金龙. 相控阵天线多波束自动测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(11): 148-152.
- DING R L, YAN Y T, CHEN J L. Design of multi-beam automatic test system for phased array antenna[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(11): 148-152.
- [16] SU ZH L, LEUNG K W, LU K. A shaped-beam antenna for wide-angle scanning phased array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(9): 7659-7669.
- [17] LUO Q CH, ZHOU Y T, QI Y H, et al. Rapid test method for multi-beam profile of phased array antennas[J]. Sensors, 2021, 22(1): 47.
- [18] 王耀华. 一种新型相控阵雷达天线测试系统设计[J]. 中国新通信, 2020, 22(5): 46.
- WANG Y H. A novel antenna test system for phased array radar [J]. China New Telecommunications, 2020, 22(5): 46.

作者简介

李丹丹(通信作者), 硕士, 工程师, 主要研究方向为天线与微波测量技术、相控阵天线控制技术。

E-mail: danli8@tsinghua.edu.cn