

文章编号: 2095-4980(2021)01-0080-06

集成天线的多通道瓦片式 T/R 组件测试

杜宝晨, 陈文俊, 张英浩, 戚珑赢

(中国船舶重工集团公司 第七二四研究所, 江苏 南京 211106)

摘要: 雷达 T/R 组件的集成度越来越高, 已出现了将天线也集成在组件上的多通道瓦片式收发 T/R 组件。由于天线的集成, 传统的传导测试方法无法对这种新结构 T/R 组件的电路性能进行直接测量。针对该问题, 提出一种辐射对比测试方法, 采用辐射法先对 T/R 组件天线单元进行测试, 然后对集成天线的 T/R 组件进行测试, 最后将天线对 T/R 组件电路性能的影响扣除, 得到 T/R 组件电路的各项性能参数。在分析测试原理的基础上, 对一种集成天线的多通道 X 波段的瓦片式 T/R 组件发射峰值功率、通道间相位一致性和接收增益等指标进行了试验测试, 测试结果与电路直接测试对比, 幅度误差 <0.69 dB, 相位误差 $<10.5^\circ$, 满足工程应用需求。

关键词: 瓦片式 T/R 组件; 辐射对比法; 近场测试; T/R 组件测试

中图分类号: TN957.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019400

Test on multi-channel tiled T/R components with integrated antenna

DU Baochen, CHEN Wenjun, ZHANG Yinghao, QI Longying

(No.724 Research Institute of CSIC, Nanjing Jiangsu 211106, China)

Abstract: The integration of radar T/R modules has become higher due to the rapid development of integrated circuits, and multi-channel tile type T/R modules that are integrated with antennas have emerged. Due to the integration of the antenna, the original component test method is no longer applicable to the transceiver of the new structure. An auxiliary radiation contrast test method is proposed, which uses the radiation method to test the component antenna unit firstly, then tests the components of the integrated antenna, and finally deducts the influence of the antenna on the component circuit performance, and obtains the performance parameters of the component circuit. Based on the analysis and testing principle, a multi-channel X-band tile T/R component with integrated antenna is utilized to test the transmit power, receive gain and phase consistency. The test results are compared with that of direct test of the circuit. The amplitude error is <0.63 dB and the phase error is $<10.5^\circ$, which meets the engineering application requirements.

Keywords: tile type T/R modules; radiation contrast test method; near field test; T/R component testing

随着集成电路的快速发展, 有源相控阵雷达使用的 T/R 组件集成度变得越来越高^[1]。目前已出现了将天线也集成在 T/R 组件上的瓦片式 T/R 组件^[2]。这种 T/R 组件将天线单元和组件电路集成在一个电路模块上, 避免了 T/R 组件电路和天线单元之间的接插件互联, 大大降低了 T/R 组件成本, 提高了集成度, 减小了体积质量, 能够提高雷达在复杂环境下的稳定性^[3], 满足相控阵雷达小型化、轻型化的发展需求^[4], 是目前 T/R 组件发展的一个重要方向。T/R 组件是相控阵雷达的重要部件, 其性能指标的优劣直接影响整个相控阵雷达的性能^[5]。T/R 组件性能指标的测试是相控阵雷达研制生产的一个重要环节^[6]。对于传统 T/R 组件, 一般采用传导法测试, 通过电缆将组件接口与仪表连接, 对 T/R 组件的电路性能指标进行测试。然而对于集成天线的瓦片式 T/R 组件这种新型的组件结构, 由于天线和电路的一体化集成, 没有了传统 T/R 组件的天线接口, 无法采用传导法直接将 T/R 组件通过电缆和测试仪表连接进行组件电路指标的测试。

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-11-07

基金项目: 装备发展部装备预先研究资助项目(41413010201)

作者简介: 杜宝晨(1993-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达相控阵天线。email:dubaochen1@163.com

针对集成天线的瓦片式 T/R 组件带来的电路性能指标测试新问题，本文提出了一种辐射对比法，实现了对集成天线的瓦片式 T/R 组件电路性能指标的测试。

1 被测 T/R 组件介绍

一种集成天线的瓦片式 T/R 组件外形见图 1，其正面为天线面，装有贴片阵列天线。天线层下面分别为 T/R 组件有源电路、组件散热模块与组件接口。

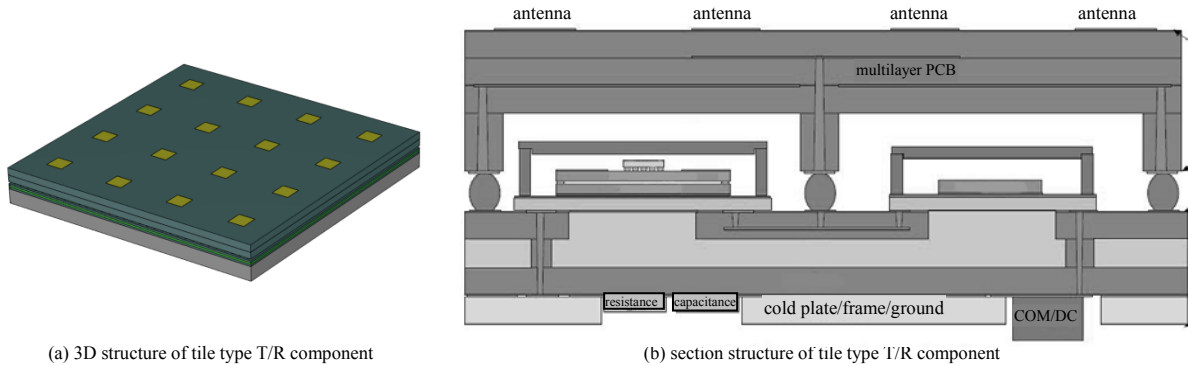


Fig.1 Structure of tile type T/R component
图 1 瓦片式 T/R 组件结构图

T/R 组件原理见图 2，由多个通道组成，每个通道主要组成部分有衰减器、移相器、功率放大器、限幅器与低噪声放大器等。T/R 组件的上行信号由 COM 口进入，功分至每个通道，经幅相控制和功率放大后通过天线向外辐射；T/R 组件天线接收到的多通道下行信号低噪声放大和幅相控制，合成一路从 COM 口输出。

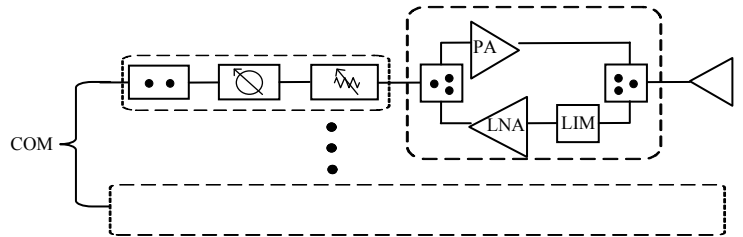


Fig.2 Schematic of internal circuit
图 2 T/R 组件原理图

2 测试原理及方法

T/R 组件的电路性能指标一般可分为：a)

幅度指标：发射峰值功率、发射增益、接收增益、增益平坦度、通道间幅度一致性与衰减精确度；b) 相位指标：移相精确度与通道间相位一致性。

与传导式测试方法不同，本文提出辐射对比法：设计制作一个测试辅助天线阵列，设计、材料、结构和工艺与 T/R 组件上天线阵列一模一样，引出天线测试接口，则该测试辅助天线阵列性能指标与 T/R 组件上的天线阵列相同^[7]。

在微波暗室中按照图 3 搭建测试系统，测试仪表一边接被测件，一边接标准喇叭天线，先测试辅助天线阵列的幅相指标^[8]，再对装有天线的 T/R 组件进行幅相指标的测试，最后将天线对 T/R 组件电路性能的影响扣除，得到 T/R 组件的各项电路性能指标。

选取发射峰值功率、通道间相位一致性及接收增益这 3 个具有代表性的性能指标进行详细的测试原理介绍，其他指标测试原理与此类似。

2.1 发射峰值功率测试

图 3 中测试仪表选择信号源与功率计，信号源接被测件，功率计接标准喇叭天线。首先对辅助天线阵列幅度指标进行测试，将信号源接天线阵列第一通道，记天线的输入功率为 P_{in} ，功率计测得标准喇叭天线接收到的功率为 P_{a1} 。依次更换天线通道，功率计测得的标准天线接收到的功率依次记为 $P_{a2}, P_{a3}, \dots, P_{an}$ 。

将辅助阵列天线更换为集成天线的瓦片式 T/R 组件，信号源接 T/R 组件射频公共端口。根据 T/R 组件发射工作所需的频率和功率设置信号源参数，电源给 T/R 组件通电，通过计算机、拨码开关与单片机控制 T/R 组件

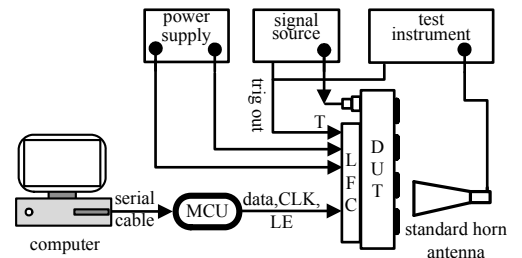


Fig.3 Test principle of transmit channel
图 3 瓦片式 T/R 组件测试原理框图

的第一通道工作,记发射功率为 P_{11} ,功率计测得的标准喇叭天线接收到的功率为 P_1 。依次更换 T/R 组件通道,各通道发射功率记为 $P_{12}, P_{13}, \dots, P_{1n}$,功率计测得的标准喇叭天线接收到的功率依次记为 P_2, P_3, \dots, P_n 。

根据弗里斯传输公式^[9],辅助阵列天线测试时,天线的输入功率 P_{in} 与标准喇叭天线接收功率 P_{an} 的关系为:

$$\frac{P_{an}}{P_{in}} = G_s G_{an} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (1)$$

式中: G_s 为标准喇叭天线增益; G_{an} 为辅助阵列天线第 n 通道的增益; r 为两天线之间的距离; λ 为电磁波波长。

集成天线的瓦片式 T/R 组件测试时, T/R 组件第 n 个通道发射功率 P_{in} 与标准喇叭天线接收功率 P_n 的关系为:

$$\frac{P_n}{P_{in}} = G_s G_{Tan} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (2)$$

式中 G_{Tan} 为瓦片式 T/R 组件集成阵列天线第 n 通道的增益。

由于测试辅助阵列天线与 T/R 组件上阵列天线完全相同,则 T/R 组件上集成阵列天线第 n 通道增益 G_{Tan} 与辅助阵列天线第 n 通道的增益 G_{an} 是相等的,因此式(1)与式(2)右边相等,将两式联立可得:

$$\frac{P_{an}}{P_{in}} = \frac{P_n}{P_{in}} \quad (3)$$

将式(3)化为分贝形式,整理可得发射峰值功率 P_{in} 为:

$$P_{in} = P_n + P_{in} - P_{an} \quad (4)$$

经过推导可知,由测试得到接入辅助天线时标准喇叭天线接收到的功率 P_{an} 与接入 T/R 组件时标准喇叭天线接收到的功率 P_n ,以及测试时记录的信号输入值功率 P_{in} 就可以计算得到 T/R 组件的发射峰值功率 P_{in} 。

2.2 通道间相位一致性测试

原理见图 3,测试仪表选择矢量网络分析仪,将矢量网络分析仪的信号输出接口接被测件,信号输入接口接标准喇叭天线^[10]。首先对辅助天线阵列相位指标进行测试,将矢量网络分析仪信号输出接口接天线阵列第一通道,信号输入接口接标准喇叭天线,记矢量网络分析仪测量的该通道相位值为 PH_{a1} 。依次更换天线通道,矢量网络分析仪测量的相位值依次记为 $PH_{a2}, PH_{a3}, \dots, PH_{an}$ 。

接下来,将辅助阵列天线更换为集成天线的瓦片式 T/R 组件,矢量网络分析仪的信号输出接口接 T/R 组件射频公共端口。根据 T/R 组件发射工作所需的频率和功率设置矢量网络分析仪参数,电源给 T/R 组件加电,通过计算机与单片机控制 T/R 组件的第一通道工作,记矢量网络分析仪测量的该通道的相位为 PH_1 。依次更换天线通道,矢量网络分析仪测量的相位值依次记为 PH_2, PH_3, \dots, PH_n 。

由于测试辅助阵列天线与 T/R 组件上阵列天线完全相同,则 T/R 组件上阵列天线单元的相位与辅助阵列天线单元相同,则测得集成天线的 T/R 组件通道的相位 PH_n 扣除天线单元相位 PH_{an} ,得到 T/R 组件电路第 n 通道的相位 PH_{TRn} 为:

$$PH_{TRn} = PH_n - PH_{an} \quad (5)$$

取所有组件电路通道相位值的平均值 $\overline{PH_{TRn}}$,则第 n 通道的相位偏差 ΔPH_{TRn} 为:

$$\Delta PH_{TRn} = PH_{TRn} - \overline{PH_{TRn}} \quad (6)$$

经过推导可知,由测试得到接入辅助天线时通道相位值为 PH_{an} 与接入 T/R 组件时通道的相位为 PH_n ,就可以计算得到 T/R 组件的相位一致性结果。

2.3 T/R 组件接收增益

原理如图 3 所示,测试仪表选择矢量网络分析仪,将矢量网络分析仪的信号输入接口接被测件,信号输出接口接标准喇叭天线。首先对辅助天线阵列进行测试,将矢量网络分析仪信号输入接口接天线阵列第一通道,测得的增益记为 G_{a1} 。依次更换天线通道,矢量网络分析仪测量得到的增益依次记为 $G_{a12}, G_{a13}, \dots, G_{an}$ 。

将辅助阵列天线更换为集成天线的瓦片式组件,矢量网络分析仪的信号输入接口接组件射频公共端口。根据组件接收工作所需的频率和功率设置信号源参数,电源给组件加电,通过计算机与单片机控制组件的第一通道工作,矢量网络分析仪测量得到的增益记为 G_1 。依次更换组件通道,矢量网络分析仪测量的增益值依次记为 G_2, G_3, \dots, G_n 。

根据弗里斯传输公式^[9],辅助天线阵列测试时,第 n 通道的链路增益 G_{aln} 表达式为:

$$G_{aln} = G_s G_{an} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (7)$$

集成天线的瓦片式 T/R 组件测试时，第 n 通道的链路增益 G_n 表达式为：

$$G_n = G_{TRn} G_s G_{Tan} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (8)$$

式中： G_{TRn} 为瓦片式 T/R 组件第 n 通道的增益。

由于测试辅助阵列天线与 T/R 组件上阵列天线完全相同，T/R 组件上阵列天线单元的增益与辅助阵列天线单元相同，即 $G_{Tan} = G_{an}$ 。因此可以将式(7)代入式(8)得：

$$G_n = G_{aln} G_{TRn} \quad (9)$$

将式(9)化为分贝形式，整理可得 T/R 组件接收增益 G_{TRn} 为：

$$G_{TRn} = G_n - G_{aln} \quad (10)$$

经过推导可知，由测试得到的接入辅助天线阵列时的链路增益 G_{aln} 与接入 T/R 组件时的链路增益 G_n ，就可以计算得到 T/R 组件的接收增益 G_{TRn} 。

3 实验测试与数据分析

采用辐射对比法对某集成天线的 X 波段八通道瓦片式 T/R 组件进行测试，测试 T/R 组件发射通道发射峰值功率、通道间相位一致性和通道接收增益。为了验证实验结果的准确性，在 T/R 组件实验电路研制时，将 T/R 组件天线和电路分开，两个模块都有接口，通过内部接插件连为一个整体，也可以分开测试。这样就可以通过传导法对 T/R 组件电路性能直接测试，测试结果与辐射对比法测试结果进行对比，从而验证辐射对比法的正确性。

将 T/R 组件置于暗室中按照上述方案进行测试，实际测试场景见图 4。



Fig.4 Testing in an anechoic chamber
图 4 暗室测量

3.1 发射功率测试结果分析

采用辐射对比法和传导法测得 T/R 组件电路发射峰值功率结果见图 5，2 种测试结果比较，辐射对比法测试结果与 T/R 组件电路直接测试结果有较好的一致性，误差在 0.63 dB 以内。产生误差的原因是天线与 T/R 组件的匹配与天线直接接 50 Ω 传输线的匹配效果不同。

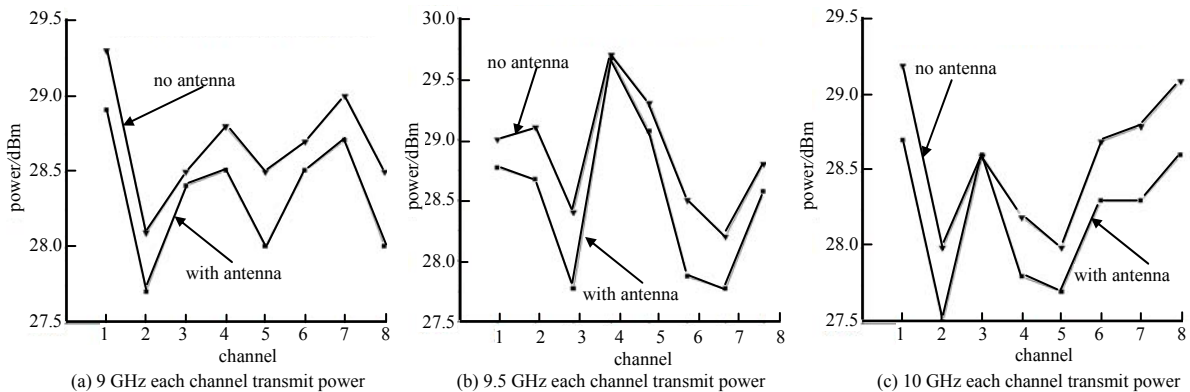


Fig.5 Test results comparison of each channel transmission power
图 5 T/R 组件各通道发射功率测试结果对比

3.2 相位一致性测试结果分析

采用辐射对比法和传导法测得 T/R 组件电路通道间相位一致性结果见图 6, 两种测试结果比较, 辐射对比法测试结果与 T/R 组件电路直接测试结果有较好的一致性, 相位一致性误差在 10.5° 以内。产生的误差是由仪表及接插件校准精确度有限造成的。

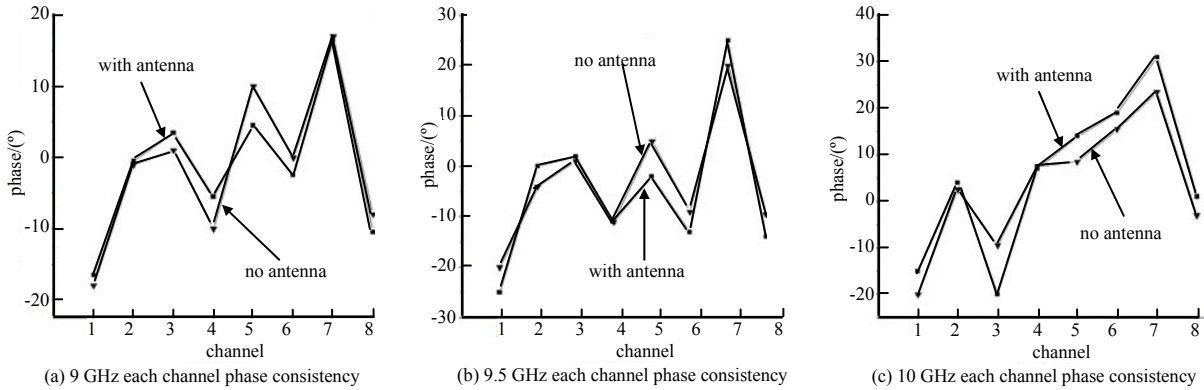


Fig.6 Test results comparison of each channel phase consistency

图 6 T/R 组件各通道相位一致性测试结果对比

3.3 T/R 组件接收增益测试结果分析

采用辐射对比法和传导法测得 T/R 组件电路接收增益结果见图 7, 两种测试结果比较, 辐射对比法测试结果与 T/R 组件电路直接测试结果有较好的一致性, 误差在 0.69 dB 以内。产生误差的原因是天线与 T/R 组件的匹配与天线直接接 $50\ \Omega$ 传输线的匹配效果不同。

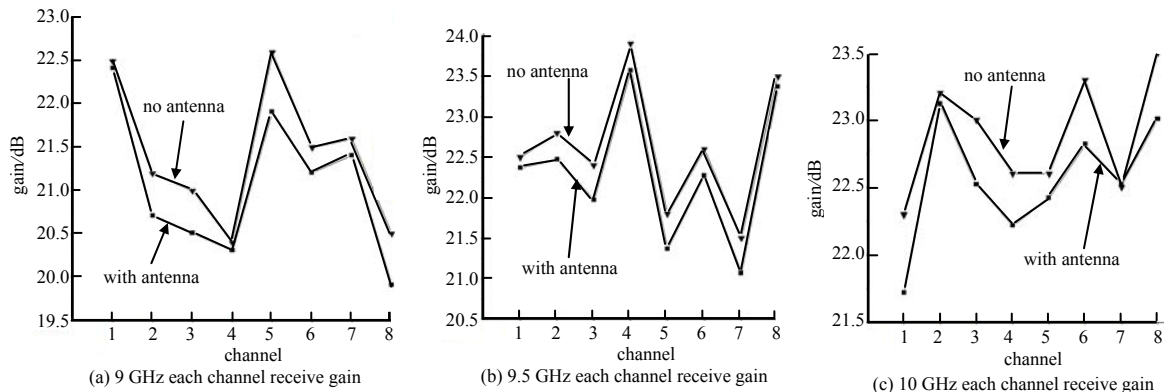


Fig.7 Test results comparison of each channel receive gain

图 7 T/R 组件各通道接收增益测试结果对比

4 结论

本文针对集成天线的多通道瓦片式 T/R 组件, 由于天线的直接集成, 传统传导测试方法不能对 T/R 组件电路性能指标进行测试的问题, 提出了一种辐射对比测试法, 并且在微波暗室中对该种测试方法进行了测试验证。验证结果表明, 测试结果与 T/R 组件电路直接测试结果有较好的一致性, 幅度误差 $<0.69\text{ dB}$, 相位误差 $<10.5^\circ$, 能满足在一定工程条件下的应用需求, 为研究该种 T/R 组件的测试问题提供了一种参考。

参考文献:

- [1] SCHUH P, RIEGER R, FLECKENSTEIN A, et al. T/R-module technologies today and possible evolutions[C]// 2009 International Radar Conference "Surveillance for a Safer World"(RADAR 2009). Bordeaux:IEEE, 2009:1-5.
- [2] 杨雨林. X 波段瓦片式相控阵 T/R 组件微系统的关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (YANG Yulin. Key technology research of X-band tile phased array T/R component microsystem[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)

(下转第 95 页)