

基于六端口混频器的研究

董洪松 洪家财
(装备学院 北京 101416)

摘要:在航天测控系统中通常对射频信号采用多级变频的方式来得到中频信号,传统的变频方式结构复杂,射频端口与本振端口具有隔离度小等缺点。针对航天系统中传统变频器的这些缺陷,设计了一个由功分器和耦合器组成无源六端口结、平方率检波器以及差分放大器组成的六端口混频器结构,其工作中心频率为 2.25 GHz。首先对六端口混频器结构和变频原理进行了分析,采用 ADS 软件分别对六端口结和六端口混频器进行了仿真。仿真表明六端口结具有很好的隔离度和相位传输特性,六端口混频器具有变频损耗小,动态范围大以及所需本振功率低等特点。同时六端口混频器结构简单,因此用六端口混频器替代传统的混频器结构有一定的优势。

关键词:六端口结;混频器;测控系统

中图分类号: TN850 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Research based on six-port mixer

Dong Hongsong Hong Jiakai
(The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: In the system of TT&C, the RF signal into IF signal by the multi-stage frequency conversion, the traditional frequency conversion structure is complex, the isolation between RF port and LO port is small. For these defects of the traditional mixer, this paper designs a six-port mixer structure consisting of a passive six-port junction, a square-law detector, and a differential amplifier, its work center frequency is 2.25 GHz. Firstly, the structure and frequency conversion principle of six-port mixer are analyzed, the six-port junction and six-port mixer were simulated by ADS software. The simulation shows that the six-port junction has good isolation and phase transmission characteristics, six-port mixer with low conversion loss, large dynamic range and low required local oscillator power. So the use of six-port mixer to replace the traditional mixer structure has some advantages with a simple structure.

Keywords: six-port junction; mixer; the system of TT&C

0 引言

无线通信技术在过去的几十年取得了巨大的发展,随着无线通信技术需求的增长,人们对无线通信也提出了更小、更轻、价格低廉和高性能等要求^[1]。这使得研究者们对新的无线通信系统中的射频前端的系统结构和电路结构产生浓厚的兴趣。因此六端口直接变频接收机^[2]和六端口超外差式接收机^[3]在通信系统中得到了广泛的关注。在六端口接收机结构中,六端口、功率检测器以及差分放大器组成的变频单元是六端口接收机的重要部分。

六端口技术是由美国国家标准局 Engen 和 Hoer 博士在 1972 年提出^[4]的。这项技术最初主要通过 4 个端口

的功率计读数来测量微波器件的反射系数,是传统的矢量网络分析仪的有力竞争^[5-6]。直到 1994 年,六端口技术第一次被应用于接收机^[7]。目前,六端口在高频接收机^[8-9]、汽车防撞雷达^[10-11]领域得到广泛运用。

六端口技术变频器的研究相对较少,但它是所有六端口应用中不可或缺的一部分。与传统的混频器相比,六端口变频器驱动本振功率低、灵敏度好、谐波抑制简单、端口隔离度大以及频带宽等优点^[12],同时六端口具有校准的优势^[13-14]。本文设计了运用于航天测控系统中 S 频段的六端口混频器,并用 ADS 软件仿真分析了六端口混频器的变频损耗、1 dB 压缩点等特性。

收稿日期:2017-04

1 六端口混频器结构

传统的混频器结构和六端口混频器结构如图1所示。六端口结、平方率检波器和差分放大器构成了六端口混频器。信号RF从端口2进入与端口1进入的本振信号在六端口中以不同的相位进行叠加输出,经过平方率检波器检出中频信号,经过差分放大器输出正交两路中频信号,最终实现了信号的变频。

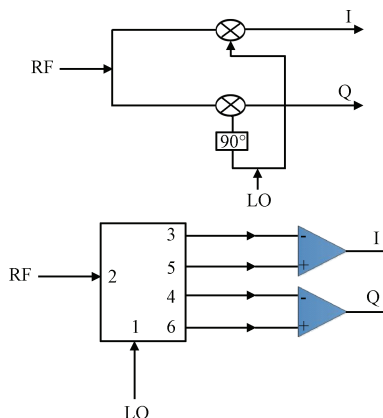


图1 传统混频器结构和六端口混频器结构

本文采用传统的六端口结结构,如图2所示,六端口结由威尔金森功分器和分支线耦合器组成。

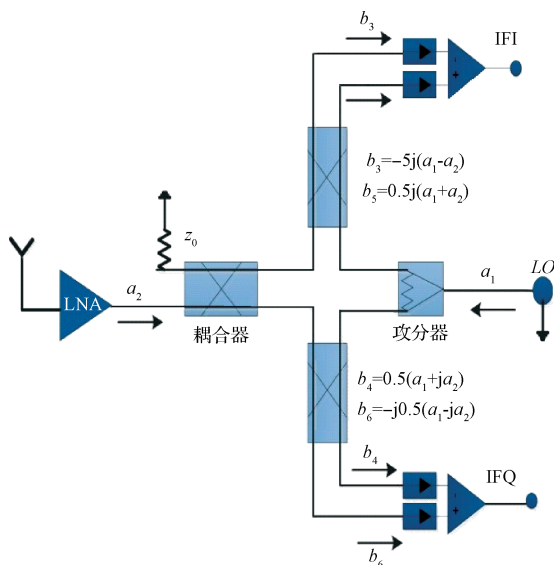


图2 六端口混频器结构

六端口结的S参数:

$$S = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -j & -j & 1 & -j \\ 0 & 0 & j & j & 1 & -1 \\ -j & j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -j & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

端口3、4、5、6输出信号可以通过六端口结的参数算出。假设两个不同幅度和相位的信号 a_1, a_2 ,两个输入信号的相位差为 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$,两个输入信号的幅度比 α 。

$$\text{LO 信号: } a_1 = a \cdot \exp[j(\omega_0 \cdot t + \varphi_1)]$$

$$\text{RF 信号: } a_2 = \alpha \cdot a \cdot \exp[j(\omega \cdot t + \varphi_2)]$$

根据六端口结的散射参数、4个端口的输出,因此可以得到:

$$b_3 = \frac{a}{2} \exp\left[j\left(\varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right)\right] \cdot \{1 + \alpha \cdot \exp[j(\Delta\varphi + \pi)]\}$$

$$b_4 = \frac{a}{2} \exp(j\varphi_2) \cdot \left\{1 + \alpha \cdot \exp\left[j\left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right]\right\}$$

$$b_5 = \frac{a}{2} \exp(j\varphi_2) \cdot [1 + \alpha \cdot \exp[j(\Delta\varphi)]]$$

$$b_6 = -\frac{a}{2} \exp\left[j\left(\varphi_2 + \frac{\pi}{2}\right)\right] \cdot \left\{1 + \alpha \cdot \exp\left[j\left(\Delta\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right]\right\}$$

$$\exp\left[j\left(\Delta\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right]\}$$

为了得到输出信号,4个端口与功率计相连,因为平方率检波器的特性,所以输出信号的电压与六端口结的输出电压的平方成比例。

$$V_i = K_i \cdot |b_i| \quad (i = 3, 4, 5, 6)$$

对于理想的检波功率计而言,常数 K_i 是相同的,设为 K 。

$$V_3 = K \frac{a^2}{4} \{1 + \alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \cos[-\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi(t)]\}$$

$$V_4 = K \frac{a^2}{4} \{1 + \alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \sin[-\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi(t)]\}$$

$$V_5 = K \frac{a^2}{4} \{1 + \alpha^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \cos[-\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi(t)]\}$$

$$V_6 = K \frac{a^2}{4} \{1 + \alpha^2 + 2 \cdot \alpha \cdot \sin[-\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi(t)]\}$$

所以输出的正交I/Q两路中频信号:

$$I(t) = V_5(t) - V_3(t) = K \cdot \alpha \cdot |a^2| \cdot \cos[-\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi(t)]$$

$$Q(t) = V_6(t) - V_4(t) = K \cdot \alpha \cdot |a^2| \cdot \sin[-\Delta\omega \cdot t + \Delta\varphi(t)]$$

2 六端口混频器的仿真

2.1 六端口结的设计仿真

六端口结性能的好坏决定着混频器性能的优劣,对于六端口结来说,LO、RF端口反射系数 S_{11} 、 S_{22} ,本振端口与射频端口的隔离度 S_{12} 以及射频信号与本振信号到各个输出端口的插入损耗都是重要的参数指标。六端口结采用ROGERS 4350B的射频板材设计而成。板材参数如表1所示。

表1 ROGERS 4350B 板材参数

H(mm)	Er	Mur	Cond	Hu/mm	T/um	TanD
0.508	3.66	1	1E+50	1.0e+33	35	0.003 7

六端口的S参数如图3、4、5、6、7所示。在实际的性能仿真中,信号的散射参数 S_{11} 、 S_{22} 和隔离度 S_{12} 都出现了中心

频率的偏移,在整个通频带中,散射参数 S_{11} 、 S_{22} 和隔离度 S_{12} 均小于 -20 dB,可以达到预期的指标。插入损耗的理论值应为 -6 dB,仿真值接近于理论值稍有偏差。端口的相位与理论值基本没有误差,各个端口相位差为 90° 的倍数。

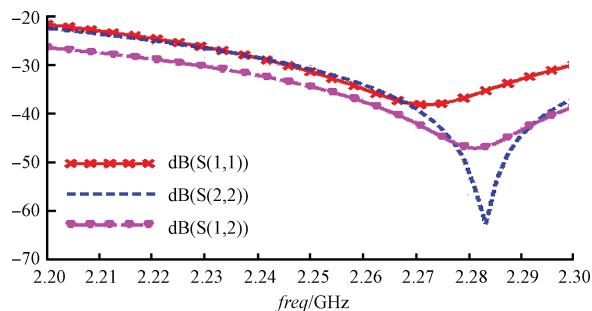
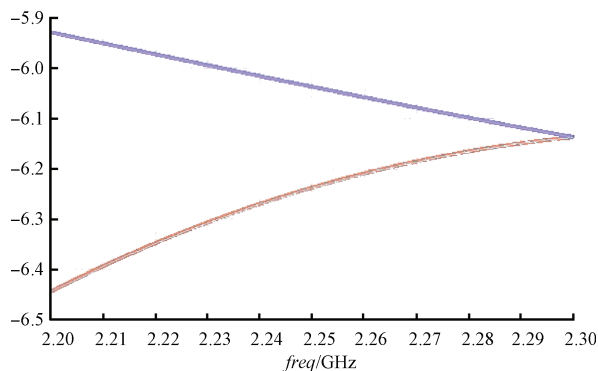
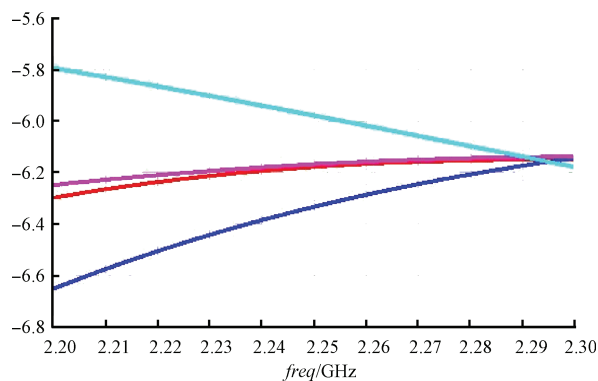
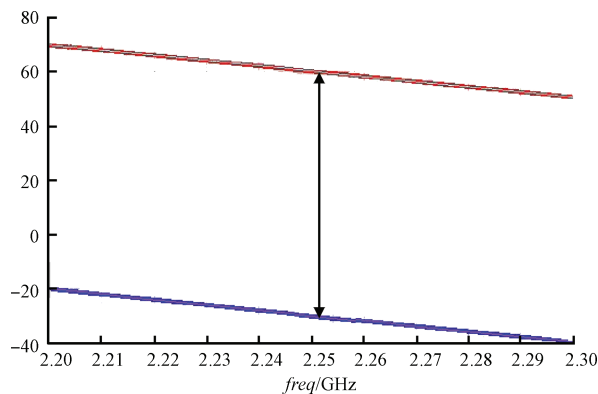
图3 回波损耗 S_{11} 、 S_{22} 和隔离度 S_{12} 图4 本振端口的插入损耗 S_{13} 、 S_{14} 、 S_{15} 、 S_{16} 图5 本振端口的插入损耗 S_{23} 、 S_{24} 、 S_{25} 、 S_{26} 

图6 本振端口到输出端口的相位

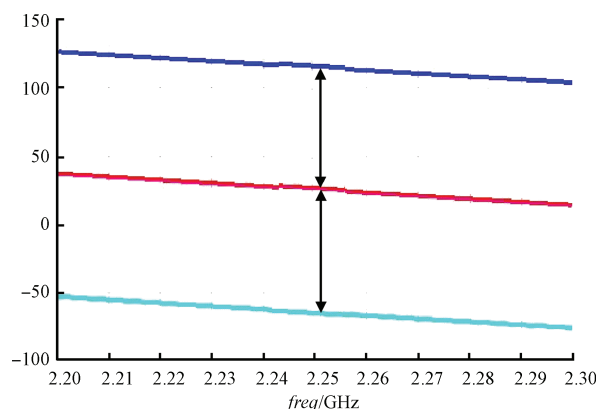


图7 射频端口到输出端口的相位

2.2 六端口混频器的仿真

给出 ADS 软件对六端口混频器电路的谐波平衡仿真, LO 信号设置为 0 dBm, 频率为 2.27 GHz, RF 信号功率设置为 -10 dBm, 频率为 2.2 GHz。4 个输出端口的波形随时间变化如图 7 所示, 输出端口的相位分别为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 。图 8 所示在 4 路信号输出后进行差分放大, 输出两路 I/Q 信号, 实现信号从射频信号到中频信号的变换。I/Q 两路信号的频谱图 9、10 可以看出, 在 70 MHz 附近有混频产生的 140 MHz 的干扰谐波, 但干扰分量谐波对中频信号的影响很小可以忽略不计。

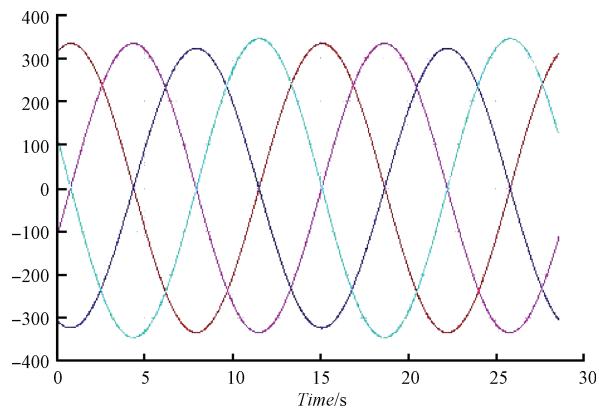


图8 4路输出信号

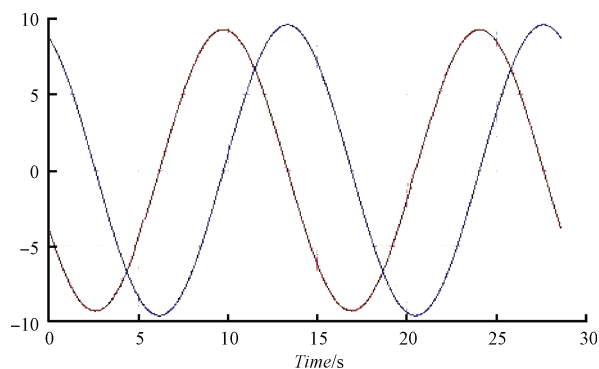


图9 I/Q 输出信号

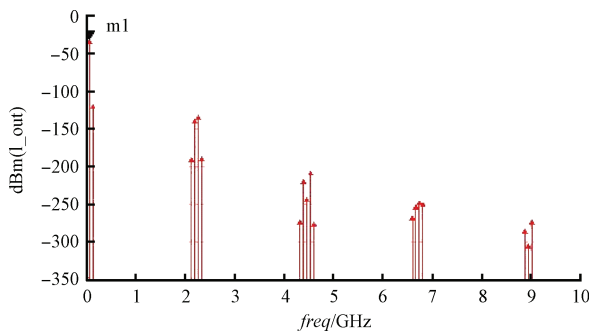


图 10 I 路输出信号频谱

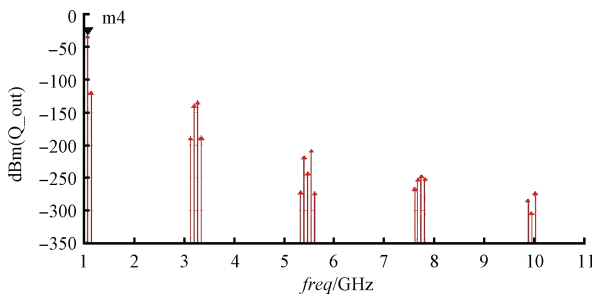


图 11 Q 路输出信号频谱

变频损耗、1 dB 压缩点是混频器很重要的特性,首先对变频损耗进行了仿真。射频 RF 为 0 dBm,本振功率 LO 的范围为 $-40 \sim 10$ dBm。从仿真图 11 可以看出,变频损耗随着本振功率 LO 增加而增加,当本振功率从 0 dBm 起,变频损耗逐渐趋近于稳定。

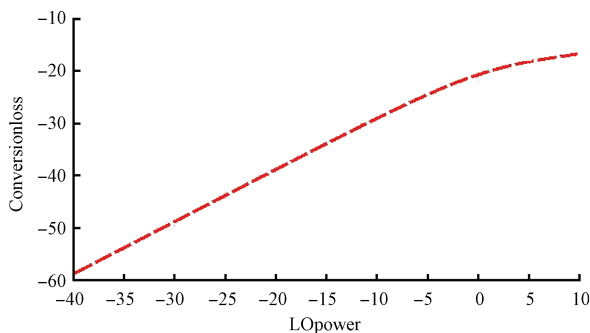


图 12 六端口混频器的变频损耗

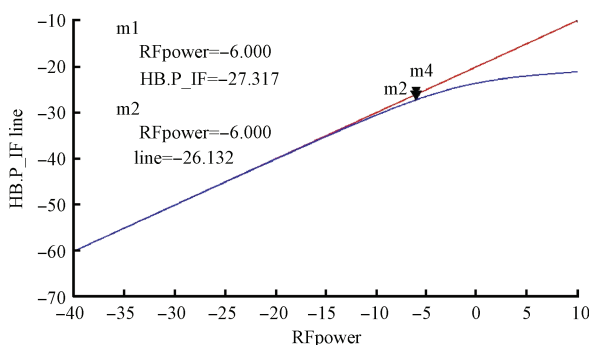


图 13 1 dB 压缩点

图 12 显示,六端口混频器的 1 dB 压缩点在 -6 dBm,在 $-40 \sim -6$ dBm 之间,六端口随着 RF 功率的增加有非常好的线性,对于功率比较低的 RF 信号,具有良好的灵敏度,因此六端口信号有非常好的优越性,同时其具有动态范围大的优势。

3 结论

本文主要介绍了六端口混频器变频原理,并通过设计六端口结、功率检波器组成的运用于测控系统 S 频段的混频器。通过对六端口结仿真,射频端与本振端口较传统的混频器有较大的隔离度。六端口混频器的整体仿真可以看出,六端口混频器有较好的动态范围和较低变频损耗以及本振功率低等优点,对于替代传统的混频器有一定的优势。

参考文献

- [1] ARSHAD N S A, IBRAHIM S Z, RAZALLI M S. Six-port demodulator in homodyne direct conversion receiver[C]. International Conference on Electronic Design, 2011:499-504.
- [2] KIM Y W. Six-port direct conversion receiver front-end with carrier recovery circuit and phase shifter using multi-layer coupled line[J]. Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, 2009, 13(11): 2267-2272.
- [3] HAMMOU D, NEDIL M, TATU S O. New implementation of Mm-wave heterodyne receiver based on six-port technology: Circuit characterization and high data-rate demodulation results[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2016(65): 139-151.
- [4] KOELPIN A, VINCI G, LAEMMLE B, et al. The six-port in modern society[J]. Microwave Magazine, 2010, 11(7):35-43.
- [5] 祁浩,汪立新,陆家明. 一种宽带微波六端口结的设计[J]. 杭州电子科技大学学报, 2016, 36(2):32-36.
- [6] 许聪聪. 基于六端口技术的反射计系统设计[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
- [7] LI J, BOSISIO R G, WU K. Computer and measurement simulation of a new digital receiver operating directly at millimeter-wave frequencies [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1995, 43(12):2766-2772.
- [8] LAEMMLE B, VINCI G, MAURER L, et al. An integrated 77-GHz six-port receiver front-end for angle-of-arrival detection[C]. Bipolar/bi CMOS Circuits and Technology Meeting, 2011:219-222.
- [9] ARSHAD N S A, IBRAHIM S Z, RAZALLI M S. Six-port demodulator in homodyne direct conversion

- receiver[C]. 2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED), 2014: 499-504.
- [10] BOUKARI B, MOLDOVAN E, AFFES S, et al. A heterodyne six-port fmcw radar sensor architecture based on beat signal phase slope techniques[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2009, 93(4): 307-322.
- [11] LINZ S, VINCI G, MANN S, et al. A compact, versatile six-port radar module for industrial and medical applications[J]. Journal of Electrical & Computer Engineering, 2013(12):2.
- [12] WU K. Multiport interferometer techniques for innovative transceiver applications[C]. IEEE Conference on Radio and Wireless Symposium, 2010:531-534.
- [13] 袁晴晴, 韦高, 阮开智. 高精度波导六端口测量系统校准的实现与优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(12):61-64.
- [14] 熊祥正, 廖成, 肖华清. 微波集成六端口系统优化设计和校准方法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(1): 20-25.
- [15] HADDADI K, LASRI T. Formulation for complete and accurate calibration of six-port reflectometer[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2012, 60(3):574-581.

作者简介

董洪松,工学硕士,主要研究方向为微波测量、六端口混频器的设计与研究。

洪家财,教授,博士生导师,主要研究方向为天线阵列、深空探测。

E-mail:dhsy05@163.com

是德科技先进的 DynaFET 建模系统在中电十三所搭建成功

2017年9月4日,是德科技公司(NYSE:KEYS)日前宣布,其先进的 DynaFET 建模系统在中国电子科技集团公司第十三研究所(以下简称为中电十三所)顺利搭建成功。

DynaFET 是以非线性矢量网络分析仪(NVNA)和人工神经网络(ANN)为基础的创新性的化合物半导体晶体管非线性模型。与许多其他的氮化镓/砷化镓模型不同,可扩展的 DynaFET 模型可生成通用的全局模型,而无需额外针对特定应用的参数调整,可应用于各类功率放大器的设计。

Keysight EEsof EDA 器件建模产品经理马龙博士表示:“是德科技是最早将人工智能技术应用于电子测量和器件建模领域的公司,DynaFET 就是其中一个典型的例子。模型考虑了自加热以及 drain-lag 等动态效应,有效地借助于全自动的测量和计算机运算能力,实现了高质量模型的一次成型,在效率提升的同时节约了人力。”

中电十三所筹建于1956年,坐落于河北省会石家庄,是我国从事半导体技术研究历史最长、规模最大、专业结构配

套齐全的综合性的工程类半导体骨干研究所之一。其专业方向为半导体专业的微电子、光电子、微电子机械系统(MEMS)、光机电集成微系统和高端半导体传感器5大领域和电子封装、材料和计量检测等基础支撑领域。

在是德科技的专家的协助下,在中电十三所的实验室顺利搭建了 DynaFET 测量平台,并对实际的样品进行了测量和建模。中电十三所模型室主任胡志富表示:“中电十三所和是德科技保持着长期的伙伴关系,非常高兴这次和是德科技专家面对面的交流。DynaFET 将大信号波形测量方法和人工神经网络自动学习算法相结合,实现了高精度非线性模型的建立,方法先进,实用结果令人期待。”

是德科技 EEsof EDA 中国区经理孟松表示:“很高兴和中电十三所再次合作。是德科技一直致力于将最先进的技术带到中国,帮助国内半导体产业的发展,缩短和世界领先水平的差距。在精准模型的基础上,期待双方就电路设计展开的进一步合作。”