

VLSI 电路的复杂网络特性研究

聂廷远,高久琰,王培培

(青岛理工大学 通信与电子工程学院,山东 青岛 266033)

摘 要: 针对电路集成快速发展所带来的电路集成密度大、结构复杂的问题,基于 IBM-HB+ Benchmark 研究集成电路的复杂网络特性. 实验结果表明,IBM-HB+ Benchmark 网络的累积度分布满足高斯分布,属于单一规模网络;IBM-HB+ Benchmark 网络同样具有小世界特性,其平均集聚系数是同等规模随机网络的 28.51 倍.

关键词: 超大规模集成电路;复杂网络;小世界特性;累积度分布

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)08-0133-04

The Research of VLSI Circuit Complex Network Property

NIE Ting-yuan, GAO Jiu-xu, WANG Pei-pei

(School of Communication & Electronic Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: The VLSI (Very Large-Scale Integration) circuit is becoming complicated and dense than ever before due to the rapid development. In the paper, we study the complex network characteristics of the integrated circuits based on IBM-HB+ Benchmark suits. The experimental results show that the cumulative degree distribution of IBM-HB+ Benchmark follows Gaussian distribution which indicates the network belongs to single-scale network. In the same time, the network has a small-world property because its clustering coefficient is averagely 28.51 times of the same scale random network.

Key words: very large scale integration circuit; complex network; small-world characteristics; cumulative degree distribution

1 引言

近几年来,复杂网络受到不同研究领域学者们的广泛关注,复杂性科学得到快速的发展. 复杂网络系统普遍存在于自然界与人类社会,如新陈代谢网络、分子结构网络、交通网络、经济技术网络^[1]. 研究现实世界网络的复杂网络特性具有重要的意义,通过发现一类网络的共同特性,可以确定这类网络的核心,从而进行进一步的研究. 目前,复杂网络的研究热点集中在网络的小世界特性^[2]和度分布的统计特性^[3-4]上. 这些理论为复杂网络的研究奠定了基础.

进一步研究表明,很多网络都具有小世界特性. Amaral 等人研究了技术经济网络、社会关系网络、生物网络,发现它们的小世界特性^[5],并将其分为三

种类型,无标度网络(scale-free network),广度规模网络(broad-scale network)和单一规模网络(single-scale network). Cancho 等人研究了电子电路,发现其具有小世界特性和无标度特性^[6-7];王哈力等人研究了组合逻辑电路的小世界特性,提出了提高电路可靠性的指导方法^[8];郑军和周海平研究了 IBM-PLACE 2.0 电路,证明了大规模电路具有小世界特性和无标度特性^[9].

复杂网络的高度复杂性可以为 VLSI 提供一种新的描述方式,加深对电路系统的深入了解;而 VLSI 复杂网络分析成果也同时能够为 VLSI 的设计可靠性提供理论参考.

本文以 IBM-HB+ Benchmark Suites 基准电路为例进行分析.

2 复杂网络统计参量

2.1 网络度分布

网络的度分布可以描述为网络中节点的度的概率分布. 本节首先介绍节点的度和平均度的定义, 然后介绍网络的度分布和累积度分布.

2.1.1 节点的度

节点的度 k_i 就是与这个节点 v_i 直接相连的边数. 网络的平均度是对网络中所有的节点的度求平均值, 表示为

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (1)$$

2.1.2 度分布

度分布可以表示网络中节点度的概率分布. 网络度分布的定义是, 网络中度为 k_i 的节点在整个网络中所占的比例, 表示为

$$P(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(k - k_i) \quad (2)$$

无标度网络是指网络的度分布满足幂指数分布:

$$P(k) \propto k^{-\gamma} \quad (3)$$

很多大尺度的网络体系都具有无标度特性, 例如 WWW 网和 Internet 网.

2.1.3 累计度分布

除了度分布, 还可以用累计度分布来描述度的分布情况, 它与度分布的关系为

$$P_k = \sum_{x=k}^{\infty} P(x) \quad (4)$$

它表示度不小于 k 的节点的概率分布. 若度分布为幂律分布, 则相应的累积度分布函数符合幂指数为 $\gamma - 1$ 的幂律分布.

$$P_k \propto \sum_{x=k}^{\infty} x^{-\gamma} \propto k^{-(\gamma-1)} \quad (5)$$

2.2 小世界网络

小世界网络是从完全规则网络向完全随机网络的过渡, 它既具有较短的平均最短路径又具有较高的集聚系数. 小世界特性的判断方法为, 实际网络平均路径长度接近同等规模的随机网络, 平均集聚系数远大于同等规模的随机网络^[6-9]. 本节首先介绍平均最短路径的定义, 然后介绍集聚系数的概念.

2.2.1 平均最短路径

测地线(geodesic)是指网络中两个节点 v_i 和 v_j 之间经历边数最少的一条简单路径. 测地线的边数称为两个节点 v_i 和 v_j 之间的最短路径. 平均最短路径 L 定义为所有节点对之间最短路径的平均值, 计

算公式为

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N d_{ij} \quad (6)$$

平均最短路径表示网络中节点间的平均分离程度, 即网络的大小.

2.2.2 集聚系数

集聚系数 C_i 是指在网络中与同一个节点连接的两个节点之间也相互连接的概率, 它表示网络中节点的集聚程度. 假设一个节点 v_i 与 k_i 个节点直接连接, 那么, 这个节点最多有 $k_i(k_i - 1)/2$ 条边, 而实际存在的边数为 M_i , 则节点的集聚系数可以表示为

$$C_i = \frac{2M_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (7)$$

整个网络的集聚系数是所有节点集聚系数的均值, 网络的平均集聚系数为

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (8)$$

通常, 具有高平均集聚系数的网络具有短的平均最短路径.

3 实验

根据文献[5], 小世界网络被分成无标度网络、广度规模网络和单一规模网络. 无标度网络的累积度分布服从幂律分布; 广度规模网络的累积度分布服从幂律分布并且在尾部有一个截断; 单一规模网络的累积度分布有一个快速衰减的尾部.

3.1 实验方案

实验采用 IBM-HB + Benchmark Suites^[10] 基准电路. BM-HB + Benchmark 中模块包含软模块和硬模块, 数目范围在 500~2 000 之间, nets 的数目范围在 5 000 到 60 000 之间, 最大模块占电路面积的比例在 0.9 到 13.6 之间. 具体描述 IBM-HB + Benchmark 电路特性的文件主要包含. nodes 文件、. nets 文件、. pl 文件、. scl 文件等. 对于. nodes 文件, 描述了模块的宽和高; 对于. nets 文件, 描述了电路中模块的连接关系; 对于. pl 文件, 描述了电路中模块的坐标位置; 对于. scl 文件, 定义了电路中布线行信息.

实验平台使用具有 2.13 GHz CPU 和 4.00 GB 内存的 HP 工作站作为测试平台, 操作系统为 Windows 7, 工具采用复杂网络专业分析平台 Pajek 和 Matlab. 实验把基准电路中的模块当作一个节点, 模块之间的连线看成边, 把基准电路等效成复杂网络. 首先, 通过计算网络的平均最短路径和集聚系数判断其是否具有小世界特性, 根据等效的复杂网络

的模型,得到网络的累积度分布,分析其特性.

3.2 实验结果及分析

IBM-HB+ Benchmark 系列包含 17 个电路,ibm01-ibm04 和 ibm06-ibm18. 图 1 为利用 Pajek 生成的 ibm01 等效复杂网络结构示意图.

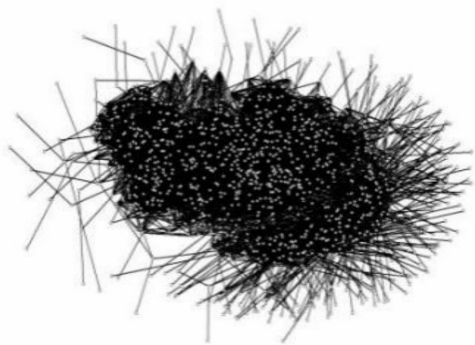


图 1 ibm01 复杂网络结构图

通过等效复杂网络模型的分析 and 计算,我们得到 benchmark 网络的节点数(N)、平均度(k)、平均最短路径(d)和集聚系数(c)如表 1 所示. 由表 1 可知,最小的网络只有 915 个模块,最大的网络有 2 339 个模块. 每一个 IBM-HB+ 平均度的值为 44. 352 3,平均度的范围在 12. 308~96. 983 2 之间,不同电路的平均度相差较大. 但是,它们的平均最短路径和集聚系数相差不大, d 的范围在 2. 960 5~4. 007,平均值为 3. 354 2, c 的范围在 0. 356 1~0. 512 5,平均值为 0. 418 7.

表 1 benchmark 小世界特性分析

	benchmark			同等规模网络				
	N	<k>	d	c	d'	c'	d/d'	c/c'
ibm01	1157	24.7744	3.5121	0.418	3.0657	0.011	1.15	38.21
ibm02	1730	96.6832	3.0034	0.5125	2.2243	0.028	1.35	18.25
ibm03	1572	45.5254	3.1795	0.5055	2.6967	0.015	1.18	34.84
ibm04	1871	45.0861	3.1781	0.36	2.7466	0.012	1.16	29.8
ibm06	915	69.6984	2.7356	0.4331	2.2156	0.038	1.23	11.36
ibm07	1407	48.0967	3.1879	0.3939	2.6349	0.018	1.21	22.49
ibm08	1555	83.3492	2.9605	0.4156	2.2921	0.027	1.29	15.52
ibm09	1398	33.422	3.4287	0.367	2.8498	0.012	1.2	30.79
ibm10	2339	21.4989	4.007	0.3953	3.5335	0.005	1.13	87.46
ibm11	1903	38.8734	3.5027	0.3561	2.836	0.01	1.24	34.48
ibm12	1870	12.308	3.816	0.4674	4.3542	0.003	0.88	134.7
ibm13	1444	28.0028	3.6026	0.428	3.021	0.01	1.19	44.12
ibm14	2152	45.8699	3.6155	0.38	2.7731	0.011	1.3	35.54
ibm15	1795	52.0769	3.3223	0.3673	2.6616	0.014	1.25	25.42
ibm16	1595	29.7768	3.3507	0.4226	3.001	0.009	1.12	45.68
ibm17	2185	28.27	3.6114	0.4467	3.1813	0.007	1.14	68.61
ibm18	1215	50.6765	3.0079	0.4485	2.5564	0.021	1.18	21.61
average	-	44.3523	3.3542	0.4187	2.8614	0.015	1.17	28.51

在此基础上,我们随机生成了具有同等规模的网络(具有相同节点数且节点平均度相同),随机网络的平均最短路径(d)的平均值为 2. 861 4,集聚系数(c)的平均值为 0. 015. 具体地,benchmark 网络

的集聚系数与随机网络的比值范围在 11. 36~134. 7 之间,平均值为 28. 51,电路的集聚系数远远大于同等规模的随机网络;平均最短路径的比值范围在 0. 88~1. 35 之间,平均值为 1. 17,平均最短路径近似相等. 由小世界网络的判定条件可知,VLSI 电路具有小世界特性.

图 2 为 IBM-HB+ 电路的累积度分布,实线为拟合曲线. 由图 2 可知,累积度分布在尾部的衰减速率比指数分布衰减迅速,拟合曲线满足高斯分布:

$$val(x) = a * \exp - (\frac{x-b}{c})^2 \tag{9}$$

IBM-HB+ 系列中所有电路的累积度分布都满足高斯分布,这表明集成电路中各个模块的连接不是随机的,度小的模块所占的比例大,大部分模块仅有少数几条连接. 其参数如表 2 所示,虽然每个电路都满足高斯分布,但其系数相差很大. 与以往的研究不同,我们发现 IBM-HB+ Benchmark 网络不满足无标度特性,它属于单一规模小世界网络.

表 2 高斯拟合曲线参数

	高斯拟合 ($val(x)=a*\exp(-((x-b)/c)^2)$)		
	a	b	c
ibm01	13290	-574.9	185.5
ibm02	0.8318	-34.22	171.8
ibm03	1.311	-97.84	133.6
ibm04	1215	-560.4	211.8
ibm06	0.7007	-6.214	121.5
ibm07	971	-721.7	273.4
ibm08	408.1	-1029	417.9
ibm09	1.64	-73.66	90.22
ibm10	16200	-614.8	192.9
ibm11	914.7	-595.2	226.4
ibm12	5957	-386.5	126.5
ibm13	8839	-907.3	293.2
ibm14	11500	-945.3	306.1
ibm15	9.541	-437.9	272.6
ibm16	16760	-913.9	287.2
ibm17	16240	-835.2	260.6
ibm18	7218	-1179	390.5

4 结束语

本文基于 IBM-HB+ Benchmark,对 VLSI 的复杂网络特性进行了分析. 实验结果表明,不同于以往的研究,VLSI 电路具有小世界特性,且累积度分布满足高斯分布,属于单一规模的小世界网络. 基于 VLSI 电路网络的基本复杂网络特性研究,可对电路信号的传播动力学、稳定性、鲁棒性和可靠性进行更深一步的研究.

参考文献:

[1] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006:260.

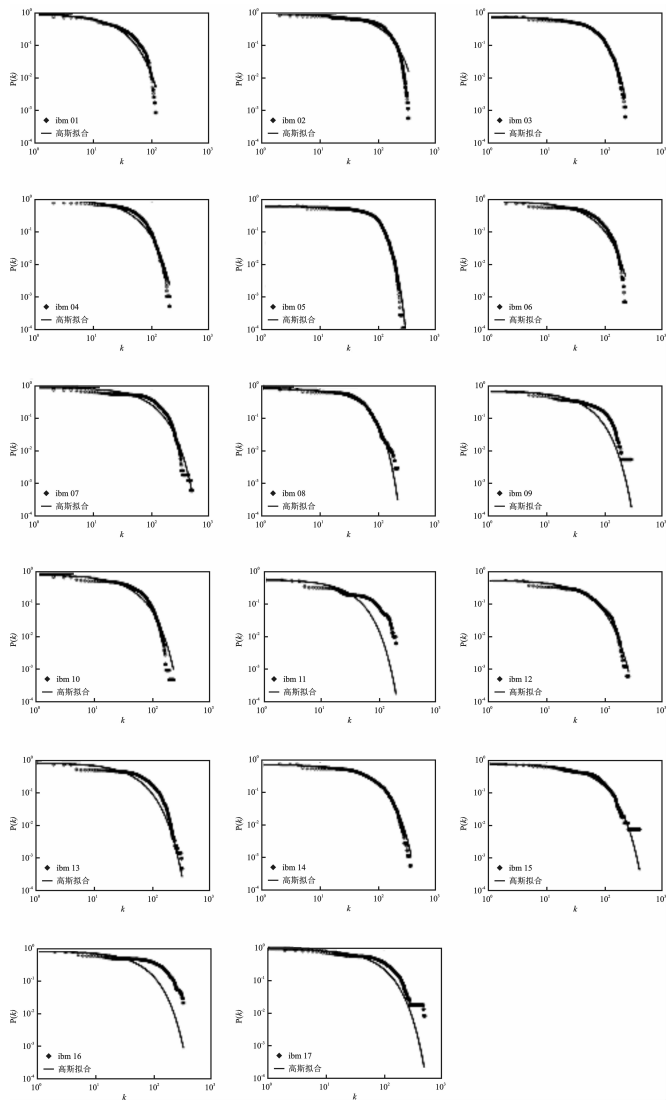


图 2 IBM-HB+累积度分布

[2] 靳雁霞,银莉,张晓闻. 以度为规则的小世界粒子群算法[J]. 微电子学与计算机, 2016(10):115-119.

[3] Strogatz S H. Exploring complex networks[J]. Nature, 2001, 410(6825):268-76.

[4] 王林, 戴冠中. 复杂网络的度分布研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(4):405-409.

[5] Amaral L A N, Scala A, Barthélemy M, et al. Stanley. Classes of small-world networks [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2000, 97(21):11149-11152.

[6] Cancho R F I, Janssen C, Sole R V. Topology of technology graphs: Small world patterns in electronic circuits[J]. Phys. Rev. E, 2001, 64(2):322-333.

[7] Valverde S, Cancho R F I, Sole R V. Scale-free networks from optimal design[J]. Epl, 2002, 60(4):512-517.

[8] 王哈力, 单董, 王希凤. 组合逻辑电路的小世界网络模型[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(4):370-374.

[9] Zhou H P, Cai S H. Large scale circuit analysis based on complex networks theory[J]. International Conference on Computer, 2010, 1:51-53.

[10] Adya S N, Markov I L. Consistent placement of macro-blocks using floorplanning and standard-cell placement[C]// International Symposium on Physical Design. IEEE, 2002:12-17.

作者简介:
聂廷远 男, (1971-), 副教授. 研究方向为 VLSI CAD 系统的设计、VLSI 芯片知识产权保护数字水印技术、信息安全等.
高久项(通讯作者) 女, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为基于复杂网络的电路约束传播.
E-mail: gaojiuxu202@163. com.
王培培 女, (1991-), 硕士研究生. 研究方向 FPGA 与复杂网络.