

Research on the Architecture of Continuously Operating Reference Stations and the Characteristics of its Networks

LIU Hui, ZOU Rong, WANG Yu'e

GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan, China

e-mail: loweliu@hotmail.com

Abstract: Continuously Operating Reference Stations(CORS) is a distribution computer system to provide position and timing services. The system specification and the quality of service depends on the system structure and components specification. The article discussed the CORS architecture. In it the system is composed by communication network, overlay network and enterprise network. System specification can be discussed by three networks using appropriate theory and method. On the other hand, the basically network features of three networks are discussed in this article. It is explored that overlay network is a kind of complex network, it has the feature of small world and scale-free network, the network topography is effect the system specifications.

Keywords: CORS; architecture; complex network; overlay network; communication network; enterprise network

连续运行参考站网络体系结构及其网络基本特征研究

刘 晖, 邹 蓉, 王玉娥

武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉, 中国, 430079

e-mail: loweliu@hotmail.com

摘 要: 连续运行参考站网络(CORS)是一种基于计算机和通信网络的用于提供定位定时服务的分布式系统, 其系统性能、服务质量等取决于系统的结构及各个组件的性能。通过建立 CORS 体系结构, 可以将系统的全局性能表达为通信网络、覆盖网络和业务网络性能的函数, 并采用相应的理论和方法进行研究和评估。本文在分析并建立 CORS 体系结构的基础上, 对 CORS 系统全局性能、拓扑结构的基本特征进行了研究。通过数值计算表明, 覆盖网络具有小世界和无尺度特性, 是一种复杂网络, 其网络拓扑结构会对系统性能产生重大影响。

关键词: 连续运行参考站网络; 体系结构; 复杂网络; 覆盖网络; 通信网络; 业务网络

1 引言

连续运行参考站网络(Continuously Operating Reference Stations, CORS)是建立在计算机网络基础上的, 集成了卫星大地测量、地球动力学、计算机、通信网络等技术的, 用于提供定位基准、定位和定时服务的信息系统。对其的研究和实践多围绕工程建设、GNSS 实时定位关键技术等方面, 较为分散, 其研究成果较为孤立且难以相互支撑。

从计算机网络的视点, CORS 可以认为是在广域

计算机网络上搭载的分布式计算和服务系统, 其全局性能取决于计算机网络的拓扑结构, 节点和边的可靠性等。除此之外, 作为 CORS 系统的全局性能还应包含定位或定时精度、服务延迟等指标, 而这些指标的研究则需引入大地测量、地球动力学等理论和方法。可以认为: 运用计算机、通信网络等理论和方法可以构成系统的物理承载平台, 大地测量等理论和方法则是构成系统的逻辑和服务平台的必要条件, 二者密切相关但又不同, 体现了跨学科专业交叉的特点。

因此, 深入剖析 CORS 系统结构, 跨专业地建立层次化的体系结构, 不仅具有工程项目的指导意义,

资助信息: 国家 863 计划资助项目(2007AA12Z309)

同时也对系统的应用研究起到重要的推动作用。

2 CORS 体系结构

2.1 体系结构概述

体系结构 (Architecture) 一词常见于系统工程和计算机软件开发中。在 ANSI/IEEE 1471-2000 中, 体系结构定义为: 某个系统的基础, 用于将系统的构成要素、要素之间的关系、要素与环境的关系等组成一体。而 The Open Group Architecture Framework (TOGAF) 则把体系结构定义为: 对某个系统规则性的描述, 或是系统在组件级的详细计划, 用于系统实现的指导。包含结构组成、彼此之间的关系, 以及指导它们设计和发展的原则和方向。

综上所述, 体系结构的内容应包含两个部分, 一个是对系统组成元算的分解, 即把复杂系统划分为若干简单组件的集合; 另一个部分是系统组件间相互关系的描述。体系结构除要描述系统的静态结构外, 还要能够对系统的动态演化和发展起到指导性作用。

由于各类系统的使用目标、技术组成、组件形式等不尽相同, 因此各系统的体系结构也不相同。体系结构的划分对于如 CORS 这样的跨行业的、集成多种技术的系统的静态和动态分析尤为有效。

2.2 CORS 体系结构

CORS 体系结构可以理解为对系统组成要素及其相互关系的划分。建立体系结构可以有多种方法, 但一般则采用层次结构进行区分。

借助计算机网络通信协议层次化体系结构的建立方法, 本文提出一种 CORS 体系结构模型如图 1 所示。

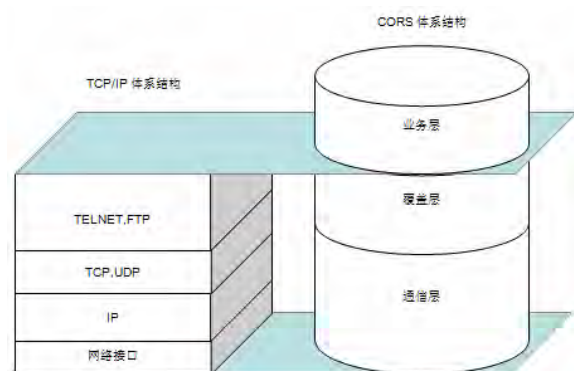


Figure 1. The Architecture of CORS
图 1. CORS 体系结构

该模型中, CORS 被描述为三层结构: 通信层、覆盖层和业务层。通信层是系统物理层, 由网络、计算机、GNSS 接收机和软件等组成, 主要完成 GNSS

等数据采集和数据传输; 覆盖层主要由数据、协议、软件等组成, 用于规划系统内的数据流向, 完成系统内部各组件以及系统间的数据共享; 业务层主要由软件、协议和用户等组成, 用于产生计算各类改正数据、向用户提供各种服务。通信层、覆盖层和业务层中的各种软件即形成了 CORS 的软件系统。

在上述模型中, 系统运行时各层都可形成由不同的节点和边构成的网络, 见表 1 所示。CORS 可以认为是三种网络的叠加体, 层与层之间通过节点相互连接。

Table 1. The definition of Network in CORS Architecture
表 1. CORS 体系结构中的三种网络

名称	节点	边	功能
业务网络	参考站	参考站间数据处理产生的基线向量	数据计算, 提供服务
覆盖网络	参考站、系统中心、用户	数据流向	控制数据流向, 建立数据共享
通信网络	计算机、GNSS 接收机、网络元件等	物理线路等	感知并获取、传输数据

2.3 全局性能与各网络性能的关系

CORS 可以认为是通信网络、覆盖网络和业务网络的叠加体。系统的可靠性、可用性、稳定性、定位精度、数据延迟等全局性能是三种网络相应指标的函数, 参见表 2 所示。

Table 2. The summary of relationship between system specifications and networks' specifications
表 2. CORS 的全局性能与三种网络性能的关系

	可靠性	精度	可用性	稳定性	数据延迟
业务网络	R_E	P	A_E	S_E	T_E
覆盖网络	R_O	--	A_O	S_O	T_O
通信网络	R_C	--	A_C	S_C	T_C
全局性能	R	P	A	S	T

系统的全局性能可以表示为三种网络对应性能的函数, 即:

$$R = R_E \cdot R_O \cdot R_C$$

$$P = P_E$$

$$A = \min(A_E, A_O, A_C)$$

$$S = \min(S_E, S_O, S_C)$$

$$T = T_E + T_O + T_C$$

在业务网络中, 网络的可靠性即为大地测量中的可靠性, 需要运用粗差探测等理论进行研究和评估; 精度取决于所采用的 GNSS 定位技术, 即取决于精密数据处理、网络 RTK、精密单点定位等技术, 一般而言, 还与参考站间距、用户位置等有关; 可用性反映的是在满足精度及可靠性指标的前提下, 系统提供服

务的时间段占理论时间的百分比，可用性指标受用户需求、电离层等大气延迟、卫星星座分布等影响；稳定性包括是参考站点稳定性和参考框架稳定性两部分，需要运用地球动力学、板块偏移、参考框架等理论进行研究和评估；数据延迟是 GNSS 算法的计算延迟。

在覆盖网络中，网络的可靠性、可用性和稳定性是指靠路由建立的数据流向、数据共享关系的可靠性、可用性和稳定性，需要运用计算机网络等理论研究和评价；数据延迟是指路由产生的数据延迟。

在通信网络中，网络的可靠性是指系统所建立的通信平台的可靠性，可用性和稳定性等指标均与计算机网络中的概念相同，数据延迟是传输的数据延迟。通信网络的性能指标需要采用计算机网络等理论和方法进行研究和评估。

在覆盖网络和通信网络中，网络的可靠性、可用性和稳定性等指标可以表示为各节点和各边的相应指标的函数。现代研究表明，网络的拓扑结构会对网络的可靠性、稳定性等性能产生重要影响。本文下文就这两种网络的拓扑结构进行描述，并就其网络基本特征进行分析。

3 复杂网络研究概述

3.1 网络基本几何量

网络现象在现实社会中大量存在，许多现象都可以以节点和节点间的关系进行描述。复杂网络（complex network）的研究方法成为科学界研究网络基本特征的主要方法。在其研究中，最重要的是对网络的基本几何量进行计算和分析。

网络基本几何量包括：度及其分布特征、度的相关性，集聚系数及其分布特征、最短距离及其分布特征等（Reka Albert, 2002）。

3.2 常见网络模型及其比较

常见的网络模型有规则网络、随机网络，小世界网络和无尺度网络等几类，其网络基本几何量的比较参见表 3。对其基本特性的分析有助于对 CORS 网络基本特性的研究。

规则网络，网络中任何节点上的度值都相等，它的特征是集聚系数大，平均最短路径大。

随机网络，以相同的概率值在若干个节点间随机连接后形成的网络（P. Erdos, 1959），其主要特征是节点度值分布服从泊松分布。它的特性是集聚系数小而平均最短路径小。

小世界网络，在规则网络上加入随机改动而成。其度值基本服从泊松分布。它的特点是同时具有较大的集聚系数和较小的平均最短路径。

无尺度网络，这是一种最与现实接近的模型，其特征是度值分布服从幂律分布。它的特点是同时拥有较高的集聚系数和较短的平均最短路径。该网络具有很强的抗随机攻击的能力，鲁棒性较强。

Table 3. The comparison of network modules
表 3. 常见网络模型的比较

模型名称	度值分布	平均集聚系数	平均最短路径
规则网络	0—1 分布	全网相同	最长
随机网络	泊松分布	约为连接概率	最短
小世界网络	类似随机网络	大于随机网络	小于规则网络
无尺度网络	幂律分布	大于随机网络	小于规则网络

4 三种网络的拓扑结构分析

4.1 通信网络

CORS 一般建立在以 Internet 为代表的已有通信网络的基础上，已有通信网络的节点和边也会引入到通信网络中，其拓扑结构十分复杂。

Internet 是世界上最大规模的通信网络，William R. Cheswick 在其研究项目中，描绘出 Internet 极为复杂的网络结构（见图 2）。R. Albert 在其研究中对 Internet 以及其衍生的 WWW、HTTP 等网络做了系统性研究，总结出这些网络的度分布基本服从 $\gamma = 2 \sim 3$ 的幂律分布，属于无尺度网络，同时也具有小世界网络的特性（R. Albert ,2002）。

综上所述，在大规模（超过 1000 个站点以上）CORS 中，其通信网络也具有无尺度网络的特征。

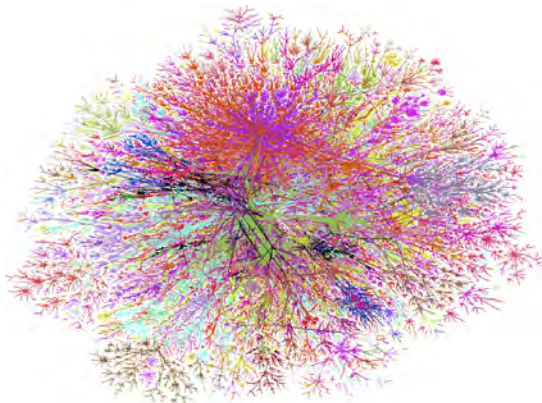


Figure 2.The topography of Internet
图 2. Internet 的网络结构¹

¹来自<http://www.cheswick.com/ches/map/gallery/index.html>，该图曾在 1998 年 12 月的 Wired 发表。

4.2 业务网络

业务网络的建立与使用的 GNSS 定位技术有关：若使用常规的实时动态（Real Time Kinematic, RTK）、码差分（Code Different GNSS, CDGPS）等基于单站的差分技术，则在业务网络中只有离散的参考站节点，形成的是非连通图；若采用 NETRTK、精密单点定位（Precision Point Positioning, PPP）等基于多站的网络定位技术，则会形成以基线为边的连通图。

业务网络的特点是其节点和边都具有准确的空间位置坐标和相对关系，且网络结构相对稳定。因此可用其节点的地域分布范围对业务网络进行度量，此范围及其周边区域之和称为系统服务区域，其周边区域大小由所采用的 GNSS 定位技术所决定。在此区域内，用户可以获得满足其需求的服务。节点边的长度是参考站间距离，其允许值由系统所采用的定位技术所决定。

在采用 NETRTK 技术的系统中，需要进行参考站间基线的实时计算，在此基础上计算双差误差改正值并发送给用户接收机进行误差内插处理。这些基线互联即形成业务网络，其基本单位是三角形。因此可以认为在提供实时定位服务的系统中，业务网络由三角形网络组合而成。构建三角形网络的方式主要有 Voronoi 图和 Delaunay 三角网方法，其中 Delaunay 三角形最近似于等边三角形，其覆盖面积最大，因而被 NETRTK 算法等大量采用。

4.3 覆盖网络

覆盖网络建立于通信网络之上，可分为两个层次：参考站与系统中心的星型结构的连接图、系统中心间的随机和星型结构的叠加体，参见图 3 所示。

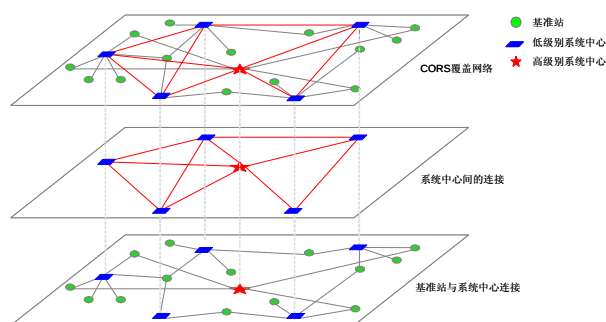


Figure 3. The hierarchy of CORS Overlay Network
图 3. 覆盖网络的层次结构

覆盖网络在系统中起到的是承上启下的作用，其网络基本特性会影响系统的全局性能。本文以下将通

过数值计算的方法分析覆盖网络的基本特性。

5 数值计算及覆盖网络基本特性分析

5.1 数据准备

为研究覆盖网络的基本特性，本文以建设中国国家 CORS（China National CORS, CNCORS）为设想进行数值计算。其组建原则如下：

1. 设立国家、区域和城市三级中心；
2. 城市中心间、区域中心邻近连接，连接概率为 P_{er} ；
3. 城市中心与区域中心之间、区域中心与国家中心之间构成星型结构，连接概率 P_{star} ；
4. 国家中心除与区域中心连接外，还与 100 个国家级参考站连接，其中 30 个为单独连接，70 个为共享连接。
5. 区域中心除与城市中心连接外，还与区域级参考站连接，数量为全区参考站数量的 1/2，其中 1/2 为单独连接，1/2 为共享连接。

根据以上原则得到的 CNCORS 覆盖网络的概况参见表 4 所示，其网络示意图参见图 3。

Table 4. The detail information of CNCORS
表 4. CNCORS 设计概况

项目	数量	说 明
参考站	1509	每个县一个参考站
城市中心	335	每个地级市 1 个
区域中心	34	每个省 1 个区域中心
国家中心	1	
节点总数	1879	中心节点 370，参考站节点 1509

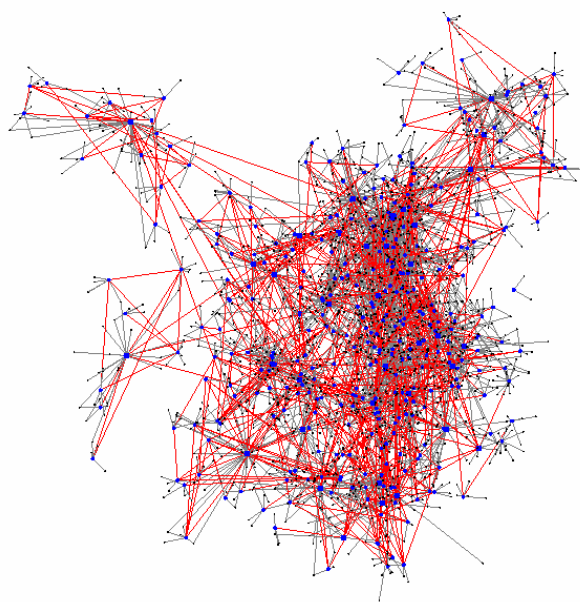


Figure 4. The sketch map of CNCORS
图 4. CNCORS 示意图

5.2 基本几何量分析

CNCORS 构成后, 进行度分布、集聚系数的计算, 并将节点度值按出现的频率在双对数坐标系中绘制出来。基本几何量计算结果见表 5, 度分布曲线参见图 5 所示。

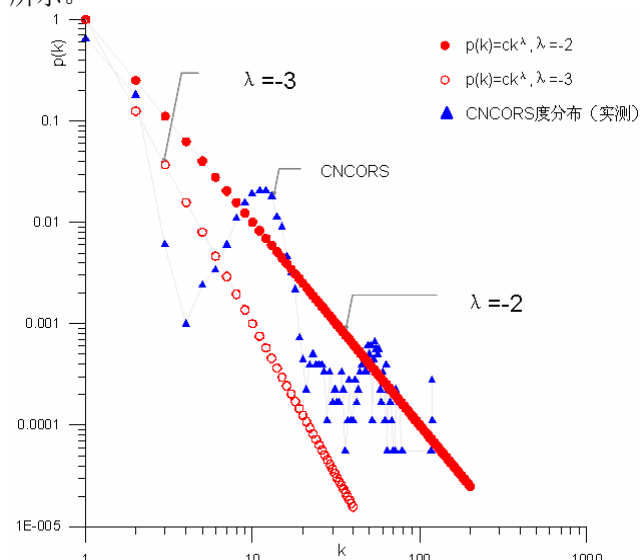


Figure 5. The degree distribution curve of CNCORS

图 5. CNCORS 度值分布曲线

Table 5. The comparisons between CNCORS and Radom network
表 5. CNCORS 覆盖网络与随机网络的比较

类别	阶 N	规模 E	连接概率 P	平均度 <k>	网络集聚系数 C	平均最短路径 l
CNCORS	2227	3074	0.0012	2.7589	0.104923	60.591
随机网络	2227	3074	0.0012	2.7607	0.001767	338.969

从表 5 可见: 覆盖网络的集聚系数比同规模的随机网络的高出近 90 倍, 平均最短路径仅是随机网络的 1/5, 此结果表明覆盖网络具有明显的小世界特性。

从图 5 可以看出, 覆盖网络度值分布具有幂律分布的某些特点, 如节点度值最小时的频率最大、度值沿幂律分布曲线上下抖动等。

5.3 拓扑结构对网络基本特性的影响分析

由于覆盖网络是由星型子网和随机子网两种网络构成, 改变每种子网的连接概率, 可以进一步研究每种子网对覆盖网络度值分布的影响。

改变星型子网连接概率 P_{star} 后, 得到的覆盖网络度分布曲线参见图 6。改变随机子网连接概率 P_{er} 后, 得到的覆盖网络度分布曲线参见图 7。

从图 6 可以看出, 改变 P_{star} 后, 度分布曲线未发生重大变化, 可见星型结构并不是覆盖网络度值分布的决定性因素。

从图 7 可以看出, $P_{er}=0.1$ 时曲线最靠近 ck^{-2} , $P_{er}=0.1$ 时距离最远, 曲线变化较大, 因此可以认为随

机网络结构对覆盖网络度值分布影响较大。

此外, 在 P_{er} 远小于 1 的情况下, 有 $p(k) \propto ck^{-2}$, 即服从 $\lambda = -2$ 的幂律分布, 此时覆盖网络即为无尺度网络。

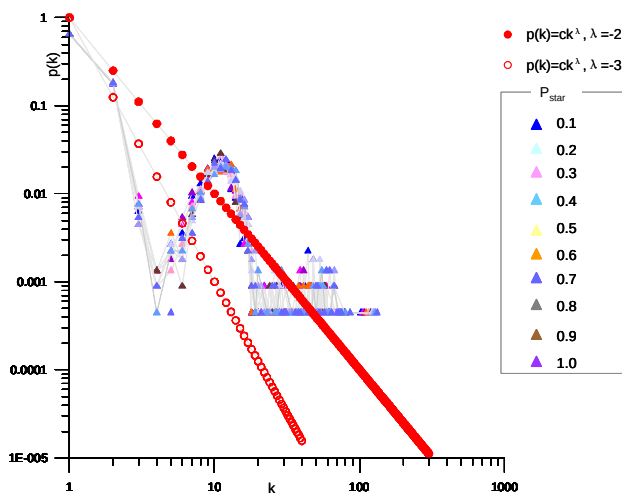


Figure 6. The relationship between P_{star} and degree distribution curve of CNCORS ($P_{er}=0.3$)

图 6. 度分布与 P_{star} 的关系 ($P_{er}=0.3$)

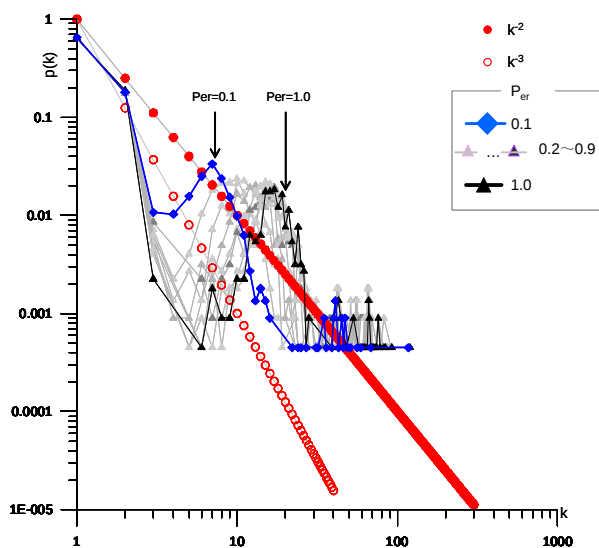


Figure 7. The relationship between P_{er} and degree distribution curve of CNCORS ($P_{star}=0.6$)

图 7. 度分布与 P_{er} 的关系 ($P_{star}=0.6$)

5.4 小结

通过对 CNCORS 的数值计算可以看出, CORS 的覆盖网络具有集聚系数高、平均最短距离短等小世界特性。同时网络的拓扑结构会对度值分布产生影响, 也就是说, 各级控制中心互联的程度将对整网的稳定性、抗攻击性能等产生重大影响。

6 结论

在 CORS 体系结构中,系统视为通信网络、覆盖网络和业务网络三种网络的叠加体。全局性能可以分解为三种网络的性能函数。对 CNCORS 的数值计算表明, CORS 覆盖网络是复杂网络,具有无尺度、小世界等特性,其网络拓扑结构将直接影响系统的抗毁性、稳定性等指标。

在大规模系统的研究、设计和服务运营过程中,除考虑用户需求、GNSS 定位技术等因素外,还需充分考虑网络基本特性带来的影响,这样才能有效地提高系统的全局性能并保障服务质量,拓宽 CORS 的应用领域。

References (参考文献)

- [1] Liu Hui. Research on Geo-Spatial Information Grid and Application in Continuously Operating Reference Stations [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.04 (Ch).
刘晖. 地球空间信息网格及其在连续运行参考站网络中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学. 2005 年 4 月.
- [2] Liu Jingnan, Liu Hui. Continuous Operation Reference System – Infrastructure of Urban Spatial Data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(3): 259-264 (Ch).
刘经南,刘晖.连续运行参考站网络-城市空间数据的基础设施. 武汉大学学报(信息科学版),2003,28(3): 259-264.
- [3] Liu Jingnan, Liu Hui. On the Development of Chinese Continuous Operating Reference Station System [J]. China Surveying and Mapping, 2003, 12, 28(Ch).
刘经南, 刘晖. 中国发展连续运行参考站系统的思考[J].中国测绘报, 2003,10,28.
- [4] Wu Jinshan, Di Zengru. Complex Networks in Statistical Physics [J], Progress in Physics, 2004(01): 18-46 (Ch).
吴金闪,狄增如.从统计物理学看复杂网络研究,物理学进展,2004 (01):18-46.
- [5] DoD Architecture Framework Working Group, DoD Architecture Framework Version 1.0-Volume I: Definitions and Guidelines, 2004.
- [6] Reka Albert, Albert-László Barabási.Statistical mechanics of complex networks, Rev. Mod. Phys. 2002(74):47-97.
- [7] P. Erdos, A.Reyni. On random graphs. Publicationes Mathematicae,1959,6:290-297
- [8] M.E.J.Newman. The Structure and Function of Complex Networks[J].SIAM Review, 2003(45):167-256.
- [9] S.N.Dorogovtsev,J.F.F.Mendes. Evolution of networks. Adv.Phys., 2002(51): 1079-1187
- [10] K.-I. Goh,E.Oh,B.Kahang, D.Kim. Betweenness centrality correlation in social networks.Phys.Rev.E, 2003(67).
- [11] P. Erdos, A.Reyni. On random graphs. Publicationes Mathematicae,1959,6:290-297.