

文章编号:1001—893X(2010)03—0006—06

认知无线电体系结构分析*

周良臣

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:分析了认知无线电网络的集中式、Ad Hoc 式和 Mesh 式体系架构及其节点与链路特性。在认知无线电终端方面,分析了系统组成,并阐述了其认知引擎中环境感知模块、方案制定与优化模块、知识库、知识进化器和接口模块的功能定义以及认知循环过程。最后,论述了认知无线电的频谱感知、频谱分配以及功率控制关键技术。

关键词:认知无线电;认知引擎;频谱感知;频谱分配;功率控制

中图分类号:TN924 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001—893x.2010.03.002

Analysis of Cognitive Radio Architecture

ZHOU Liang-chen

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Three kinds of cognitive radio(CR) networks with infrastructure, Ad Hoc and Mesh architecture are firstly given, followed by the description of the characteristic of their nodes and links. Secondly the composition of CR terminal is analysed with emphasis on cognitive engine (CE). The CE includes several modules of environment sensor, solution and optimization maker, knowledge base, knowledge evolver and interface. The functions and definitions of the modules and the cognitive cycle are subsequently discussed. Finally, the key techniques of spectrum sensing, spectrum allocation and power control are presented.

Key words: cognitive radio(CR); cognitive engine(CE); spectrum sensing; spectrum allocation; power control

1 引言

认知无线电台^[1]动态地感知无线通信环境,利用人工智能等技术,进行推理、学习与决策,实时改变自身发射功率、频率、编码调制方式等参数或设定,以适应外部环境的变化,从而优化自身或网络的传输性能。高频谱利用率与高可靠通信是认知无线电(Cognitive Radio, CR)的出发点。

受限于功率与天线尺寸,移动终端的频谱资源十分有限,且目前授权占用的频谱管理方式导致了频谱资源的极大浪费^[2];另外,无线环境的开放性使得通信更易受到干扰。所以,高频谱利用率与高可

靠通信正是无线通信日益重要的两个需求。认知无线电通过动态接入授权用户空置的频谱,根本性地提高了频谱效率。与之相比,CDMA、OFDM 和 MIMO 等技术提高频谱效率的能力则显得微不足道。认知无线电动态监测环境变化并实时优化传输方案与性能,使得无线通信进一步提高频谱效率的同时,也具有了内在的高可靠性,相比于跳频、扩频等现有方式,则更为智能与可靠。

认知无线电最早由 Joseph Mitola 提出^[1],随后,包括 FCC^[3]在内的多家机构和以 Simon Haykin^[4]为代表的诸多学者均对认知无线电的定

* 收稿日期:2009—12—09;修回日期:2010—01—27

义进行了阐述。这些定义最后都逐渐统一为:认知无线电是以动态感知、人工智能的学习与决策以及可实时重配置为手段,以优化利用频谱和高可靠通信为目的的无线通信系统。

认知无线电自提出至今,已在全球范围内得到了广为关注与大力研究。如美国的 Berkeley^[5-6]、Rutgers^[7]、德国 Karlsruhe^[8] 等大学机构在认知无线电的网络体系结构、频谱接入算法、空间信号检测和分析及 QoS 保证机制等方面取得了较为重要的成果。但是,还未见到关于一个完整的认知无线电系统的研究报告。

IEEE 已于 2004 年 10 月正式成立 IEEE 802. 22 无线区域网(WRAN)工作组,2007 年下半年完成了标准化工作^[9]。IEEE 802. 22 的核心技术就是 CR 技术。

本文对认知无线电体系进行阐述,包括认知无线网络体系、认知无线电终端体系以及关键技术。

2 认知无线网络体系

认知无线网络是由各种通信系统或网络组成的异构网络。这种异构性表现在无线接入技术、网络、用户终端以及服务提供者各方面。认知无线网络体系的设计需要站在优化整个网络的角度,而不仅是提高链路上的频谱效率。在用户看来,网络优化意味着总是能够在任何时间任何地点满足其需求。

2.1 网络架构

认知无线电的基本组成包括移动站(MS)、基站/接入点(BS/AP)和骨干/核心网。这 3 种基本组成可构成集中式网络、分布式的 Ad Hoc 网络以及 Mesh 网^[10]。

如图 1(a)所示,在集中式的网络架构中,MS 仅仅与 BS/AP 直接进行通信。在同一小区的 MS 之间通信必须通过 BS/AP 进行转发,不同小区 MS 之间的通信则需要骨干/核心网进行路由。

如图 1(b)所示,在 Ad Hoc 的网络架构中,不存在基础设施。如果某个 MS 发觉附近存在另一个 MS,且它们可以通过一定的标准/协议进行互联,则会建立连接,形成 Ad Hoc 网络。不同的链路之间可能采用不同的通信技术。认知无线电台之间可以通过现存的协议(如 WiFi、蓝牙)或者动态地利用频谱空穴进行通信。

如图 1(c)所示,认知无线电 Mesh 网络架构是集中式架构与 Ad Hoc 架构的结合,也将是更为普遍的认知无线网络架构。BS/AP 作为无线路由器构成无线骨干网。MS 之间可直接通信,可接入到 BS/AP,也可利用其余 MS 进行多跳中继,接入到 BS/AP。部分 BS/AP 可作为网关接入到有线骨干/核心网中。由于并不是所有的 BS/AP 都需接入有线骨干/核心网,所以,网络的架设与规划都更灵活,耗费更少。由于 BS/AP 具有认知能力,而潜在可用的频谱空穴较多,所以,BS/AP 构成的无线链路足以提供无线骨干网的能力。

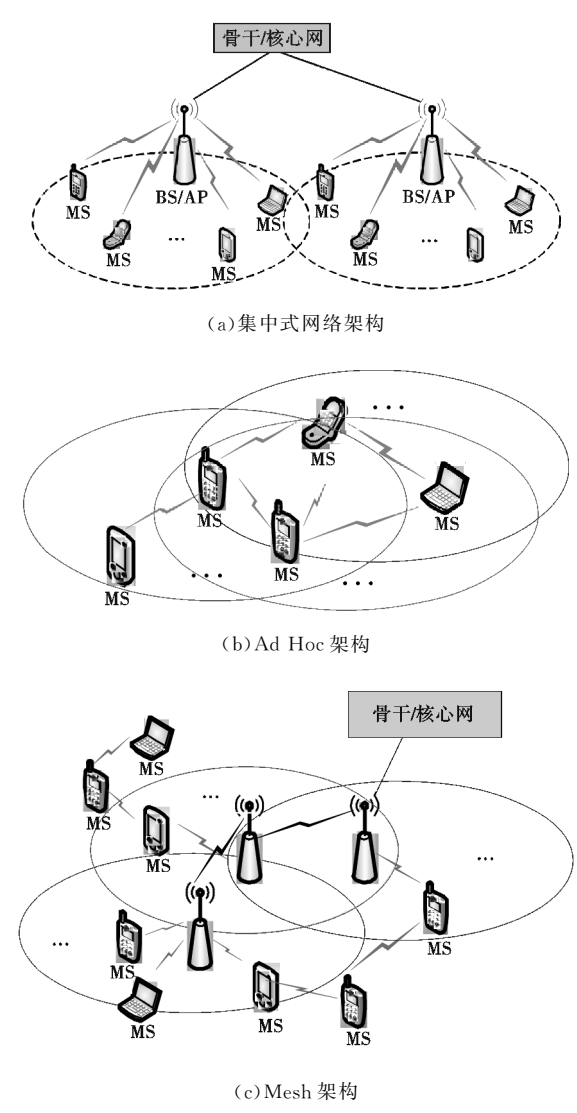


图 1 认知无线网络结构

Fig. 1 The architecture of cognitive radio networks

2.2 节点与链路

认知无线网络中可包含两类系统:主用户系

统与认知无线电系统^[10]。

主用户系统在某些频段具有最高的接入优先级,被称为这些频段的授权用户,对应频段则称为其授权频段。主用户系统在其授权频段的工作不得受其它非授权用户的影响。认知无线电系统往往不具有授权频段,而是通过动态地接入频谱空穴进行工作。

主用户系统与认知无线电系统均具有 MS 和 BS/AP,所以,认知无线网络中包含 4 类节点:主用户 MS(PR-MS)、主用户 BS/AP(PR-BS/AP)、认知无线电 MS(CR-MS)、认知无线电 BS/AP(CR-BS/AP)。其节点间链路关系如表 1 所示。

表 1 认知无线网络链路关系

Table 1 Links in cognitive radios networks

RX\TX	CR-MS	CR-BS	PR-MS	PR-BS
CR-MS	存在	存在	存在	存在
CR-BS	存在	存在	存在	不存在
PR-MS	存在	存在	存在	存在
PR-BS	存在	不存在	存在	存在

由表 1 可知:

(1)作用范围内的 CR-MS 之间可直接通信,并可协同感知各频段的频谱空穴。需要有公用控制信道,用于交换频谱空穴信息;

(2)CR-BS 可动态地感知可用频谱,并与其作用范围内的 CR-MS 通信。在 CR-BS 的协作下,CR-MS 可接入骨干网或与其它通信系统;

(3)CR-MS 可将自身配置为 PR-MS,并接入 PR-BS;

(4)CR-BS/AP 可以形成 Mesh 网的无线骨干网,它们可利用认知能力,动态选择频谱接入,从而具有大的容量。它们中的一部分可接入有线骨干/核心网,从而为整个认知无线网络提供了骨干/核心网的接入能力;

(5)PR-MS 与 PR-BS/AP 之间直接通信。PR-BS/AP 负责管理本区域的通信,并为 PR-MS 提供对骨干/核心网的接入能力;

(6)CR-MS 或 CR-BS/AP 将自身配置为主用户系统的一部分,从而具有与 PR-MS 的通信能力;

(7)PR-MS 之间,可建立 Ad Hoc 的网络连接。

3 认知无线电终端结构

认知无线电终端最主要特征是其对环境的感知、学习以及基于获得知识的通信方案决策能力。为了动态加载实时修改的通信方案,认知无线电还必须具有可重配置的无线电平台,通常基于软件无线电技术。所以,认知无线电终端体系结构如图 2 所示,主要包括认知引擎与可重配置无线电平台^[11]。

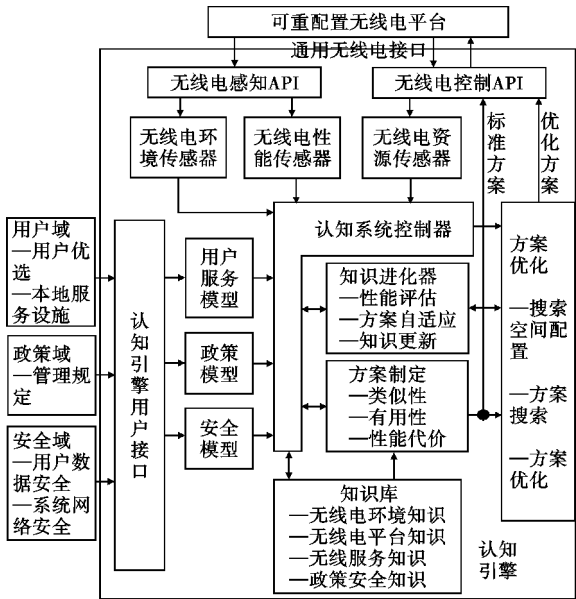


图 2 认知无线电终端结构

Fig. 2 The architecture of cognitive radio terminal

认知无线电受到多方面的约束,包括无线通信、无线电工程、机器学习、频谱管理、应用服务、市场以及其它方面。一般主要考虑的域为政策域、无线电域和用户域。政策域主要包括管理规则,如频率规划、发射功率和干扰限制。政策域确保认知无线电操作的安全性及合法性。用户域描述接入优选和性能等由使用者提出的需求,主要包括如接入可用性、服务类型与 QoS 等目标。认知无线电台需要自适应地调整操作,满足这些要求。无线电域主要包括无线电环境与无线电平台。结合相应的外部环境和自我感知,以两种形式支持机器推理:在许可的情况下达到目标或者在资源受限情况下附加约束。

认知无线电的认知引擎从这 3 个域获取知识,建立起环境图,利用人工智能,形成资源调配决策,对无线电平台进行重配置,并通过多次学习和修正,获得电台资源利用以及频率资源利用的优化。

认知引擎包括以下几个方面：

(1)环境感知模块:主要处理、收集和识别各域的信息。无线电域(环境、性能与无线电资源)、用户域、政策域以及安全域的信息均被提取,并对各域进行建模,向认知引擎的学习核汇报;

(2)方案制定模块:根据当前输入的问题场景,包括环境、用户目标和可用资源等,进行基于以往知识的推理,制定电台传输方案;

(3)方案优化模块:利用遗传算法,进行进化搜索,对传输方案优化,使之性能在可能的情况下最好,或者适应新的环境;

(4)知识库:包含各个域的知识数据,如态势信息、性能标准以及推理和学习的通用准则等;

(5)知识进化器:在方案执行后,对性能进行评估,与方案优化模块之间进行迭代,获得优化的方案,并在这些过程中进行学习,更新知识库;

(6)接口模块:主要包括认知引擎与各个域的接口。认知引擎通过平台独立的电台域接口,可以在不改变自身算法的情况下,对不同的电台硬件进行监视、配置与控制。认知引擎还通过对应接口获取用户域和政策域的信息。

认知无线电基于图 2 所示的体系架构,通过认知循环实现对外界的智能反应。在认知循环中,终端的智能通过推理、决策、自适应与知识积累来获得进化。如图 3 所示,认知无线电的认知循环包括内外两层。

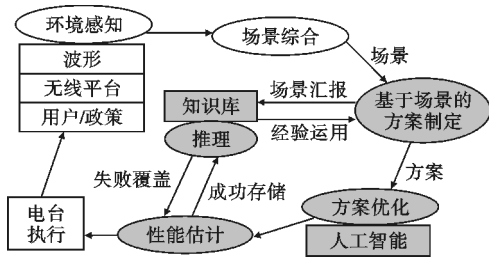


图 3 认知循环

Fig. 3 Cognitive cycle

外循环由信息识别、自适应行为构成,直接与各个域交互。外循环感知环境,提取波形特征、干扰、信道特性、用户要求、频谱管理规范等信息,并将它们提供给内循环。同时,外循环解析内循环给出的方案,产生自适应指令,由无线电平台执行。

内循环则利用人工智能,构成通用的方案决策与自学习。在新方案的产生与执行过程中,知识库

通过反馈与推理,获得更新。认知引擎即在进化其知识的过程中,进行着自学习。

4 认知无线电关键技术

认知无线电中关键技术包括网络路由、功率控制、频谱分配、频谱感知与信道估计、自适应数据传输以及可重配置平台等,在此仅对频谱感知、频谱分配与功率控制进行阐述。

4.1 频谱感知

认知无线电频谱感知包括两个层面^[11]:第一个层面是频谱能量感知,获得频带占用情况的知识,进而选择适当的信道与功率进行通信;第二个层面是对感兴趣频带的波形进行感知,或者对信道进行感知建立信道传播模型。感知到的波形知识支持电台认识到该频带已存在电台的通信方式,从而可与其通信,实现网内电台对资源的协同利用。对信道波形感知涉及从射频到基带信号处理的整个链路,包括载波同步、编码调制信号的分类识别等。对信道的感知用于支撑传输方案决策。

目前,多数研究集中于第一层面。基本的检测手段有匹配滤波、能量检测、循环特征检测等。但由于多径等衰落的影响,依靠网络中单个节点的检测性能还有待提高。有学者提出了多天线和多节点协作检测技术^[12-15],通过空间分集,提高频谱感知性能。

4.2 频谱分配

认知无线网络中存在主用户系统与认知系统。主用户系统在其授权频段内工作,当其一定时间或空间空置该频段时即形成频谱空穴,认知系统可接入频谱空穴。但是主用户在该频段具有优先权,认知系统不得在该频段对主用户造成干扰。另外,认知无线电系统的频谱分配还要受到很多政策、标准及接入协议的限制。所以,认知无线电的频谱接入本质上是受限的频谱分配问题,即在认知用户可用频谱根据主用户占用情况动态变化的条件下,确定哪些认知用户可以接入网络并如何协调这些认知用户优化频谱分配。

在上文所述约束下,认知无线电动态频谱分配主要以最大化频谱利用率为目标,同时考虑干扰的最小化和接入的公平性。Mitola 提出认知无线电后,在文献[16]中给出了标准的无线礼仪协议的初始框架,主要包括主用户与认知用户之间交互的租

用频谱协议、当主用户再次出现时服从的补偿协议、频谱使用优先级协议等。目前,频谱分配方法的研究热点是基于博弈论及其改进^[17](如贝叶斯对策等)。改进型博弈方法嵌入了学习功能,使电台在频谱分配方面具有学习能力。同时很多研究以图着色理论为工具丰富了认知无线电的动态频谱分配^[18]。认知无线电频谱分配方法可分为集中式^[19]与分布式,也可分为合作方式与非合作方式^[20-21]。具体采用的方式由网络架构与关键算法的要求决定。

一般的频谱分配算法大都假设认知用户已知全部频谱的准确可用情况。但实际上,由于硬件条件、认知用户的能量限制、传输特性的影响以及检测算法的误检和虚警都会影响MAC层频谱分配算法的性能。所以,目前有研究把物理层检测性能与MAC层的接入策略联合考虑,而这也是认知无线电系统实现时必须考虑的。

4.3 功率控制

认知无线电环境下多用户功率控制技术尚处于初始研究阶段。认知无线电功率控制的目标是:在不对主用户造成干扰的情况下,确保认知用户的服务质量。另外,信号检测与功率控制的时间应足够短,以适应认知无线电空闲频谱快速时变的要求。所以,认知无线电功率控制算法还需要具有较低的复杂度。总之,认知无线电功率控制是一个多目标优化的过程。

现有功率控制算法主要分为分布式场景与集中式场景两类。分布式场景大多以博弈论为基础^[22]。自组织网络中的功率控制方法也可借鉴^[23]。对于集中式,由于BS掌握网内拓扑、频率分配等方面信息,所以其功率控制相对容易,还可与频谱分配、接入控制进行联合考虑^[24-25]。

5 结 语

认知无线电台感知外部环境,动态地对空闲频谱优化利用,是高效利用频谱的高可靠通信系统,其价值或意义主要体现在无线网络的应用中。认知无线网络包括主用户系统与认知用户系统,可具有集中式、Ad Hoc式与Mesh式3种架构,后者具有更为广泛的适用性。其中,主用户系统在其授权频段享有优先接入权。在结构上,除了感知部分外,认知无线电台与普通电台的区别还在于它具有认知引擎。认知引擎以及对外感知使得电台可根据外部环

境或规则的变化,进行通信方案决策、推理学习、智能地自适应优化传输。认知无线电的关键技术包括网络层的路由、MAC层的功率控制与频谱分配以及物理层的频谱感知、信道估计和自适应传输等。

参考文献:

- [1] Mitola III J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications [C]//Proceedings of the 6th IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communication, San Diego, CA:IEEE,1999: 3-10.
- [2] Hoven N K. On the feasibility of cognitive radio, Master of Science[D]. Berkeley:University of California,2005.
- [3] FCC Et Docket no. 03-322, Notice of proposed rule making and order[S].
- [4] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on selected Areas in Communications,2005,23(2):201-220.
- [5] Brodersen R W, Wolisz A, Cabric D, et al. CORVUS: a cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum[Z]. UC Berkeley: Berkeley Wireless Research Center,2004.
- [6] Cabric D, Mishra S M, Brodersen R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radio [C]//Proceedings of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. USA: [s. n.], 2004:772-776.
- [7] Ackland B, et al. NeTS-ProWIN: high performance cognitive radio platform with integrated physical and network layer capabilities[Z]. Technical Report,2004.
- [8] Menguc, Jondral F. Extracting the channel allocation information in a spectrum pooling system using a pre-filter delay and multiply nonlinearity[C]//Proceedings of the 2003 IEEE Workshop on Statistical Signal Processing. St. Louis, USA:IEEE,2003:46-49.
- [9] 郭彩丽,张天魁,曾志民,等. 认知无线电关键技术及应用的研究现状[J]. 电信科学,2006,22(8):50-55. GUO Cai-li, ZHANG Tian-kui, ZENG Zhi-min, et al. Investigation on key techniques and applications of cognitive radio[J]. Telecommunication Science, 2006, 22(8):50-55. (in Chinese)
- [10] Chen K-C, Peng Y-J, et al. Cognitive Radio network architecture: part I-General structure [C]// Proceedings of the second international conference on ubiquitous information management and communication, Korea:[s. n.],2008:114-119.
- [11] Bin Le, Francisco A. G. Rodriguez, et al. A public

- safety Cognitive Radio node[C]//Proceedings of the SDR'07 Technical conference and product exposition, Denver, CO:[s. n.],2007.
- [12] Cabric D, Mishra S M, Brodersen R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios [C]//Proceedings of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, USA:[s. n.], 2004:772—776.
- [13] Ghasemi A, Sousa E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments [C]//Proceedings of 1st IEEE Sympium New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Baltimore, USA:IEEE, 2005:131—136.
- [14] Pandharipande A, Jean—Paul M G Linnartz. Performance analysis of primary user detection in a multiple antenna cognitive radio [C]//Proceedings of IEEE international conference on communications (ICC'07). [S. l.]:IEEE,2007:6482—6486.
- [15] Dobre O A, Abdi A, Bar—Ness Y. Selection combining for modulation recognition in fading channels [C]//Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM'05). [S. l.]: IEEE, 2005: 2499—2505.
- [16] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications[J]. Mobile Networks and Applications,2001,6(5):435—441.
- [17] Nie, C Comaniciu. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks[J]. Mobile Networks and Applications,2006,11(6):779—797.
- [18] Wang Wei,Liu Xin. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks [C]// Proceedings of IEEE Fall VTC 2005. [S. l.]:IEEE, 2005:690—694.
- [19] Brik V, Rozner E, Banarjee S, et al. DSAP: a protocol for coordinated spectrum access[C]//Proceedings of IEEE DySPAN. [S. l.]:IEEE,2005:611—614.
- [20] Cao L, Zheng H. Distributed spectrum allocation via local bargaining [C]//Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Sensor, Ad Hoc communication and Networks. [S. l.]: IEEE, 2005: 475 — 486.
- [21] Cao L,ZHENG Hai-tao. Distributed Rule-Regulated spectrum sharing[J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 2008,26(1):130—145.
- [22] Wang W, Cui Y L, Peng T, et al. Noncooperative Power Control Game with Exponential Pricing for Cognitive Radio Network[C]//Proceedings of IEEE 65th Vehicular Technology Conference Spring. Dublin, Ireland:IEEE,2007:3125—3129.
- [23] Qian L J, Li X F, Attia J, et al. Power Control for Cognitive Radio Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of 15th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks. [S. l.]:IEEE,2007:7—12.
- [24] Hoang A T, Liang Y C. A Two-Phase Channel and Power Allocation Scheme for Cognitive Radio Networks[C]//Proceedings of IEEE 17th International Sympium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. [S. l.]:IEEE,2006:1—5.
- [25] Zhang L, Liang Y C, Xin Y. Joint Admission Control and Power Allocation for Cognitive Radio Networks [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. [S. l.]: IEEE,2007:673—676.

作者简介:

周良臣(1975—),男,四川南部人,2007 年于电子科技大学电子工程学院获通信与信息系统专业博士学位,现为工程师,从事通信系统研发工作。

ZHOU Liang—chen(male) was born in Nanbu, Sichuan Province, in 1975. He received the Ph. D. degree in communication and information system from the Electronics Engineering Institute of the University of Electronic Science and Technology of China, in 2007. He is now an engineer. He is currently engaged in the development of communication systems.

Email:lc. z@163. com