

分子通信研究综述

黎作鹏^{1,2}, 张菁¹, 蔡绍滨¹, 王勇¹, 倪军^{2,3}

(1. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 爱荷华大学 计算机科学系, 爱荷华州 爱荷华城 52242; 3. 爱荷华大学 卡佛医学院, 爱荷华州 爱荷华城 52242)

摘要: 基于生物启发的分子通信是一种以生物化学分子作为信息载体、用于互联纳米机器以组成分布式纳米网络的通信技术。归纳了分子通信的定义和特性, 以及基于分子通信纳米网络的应用领域和国内外相关领域的重要科研活动与项目; 介绍了分子通信的系统结构, 其中重点描述了信息分子的传输机制; 分别从系统的设计与实现、理论研究和基于分子通信的纳米网络技术3个方向总结和分析了分子通信的研究与发展现状, 并展望了未来的研究方向。

关键词: 分子通信; 生物启发; 纳米机器; 纳米网络; 信息分子的传输

中图分类号: TN91; TP393; TP384

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)05-0152-16

Review on molecular communication

LI Zuo-peng^{1,2}, ZHANG Jing¹, CAI Shao-bin¹, WANG Yong¹, NI Jun^{2,3}

(1. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Department of Computer Science, the University of Iowa, Iowa City 52242, USA;

3. Carver College of Medicine, the University of Iowa, Iowa City 52242, USA)

Abstract: Bio-inspired molecular communication (MC) is a kind of communication technology using biochemical molecules as the information carrier and applied to interconnect nano-machines to constitute the distributed nano-networks. The definition and properties of MC, applications of nano-networks based on MC, important research activities and projects of MC were generalized. With particularly concerning the propagating mechanism of information molecules, the architecture of MC system was introduced. From the aspects of the design and implementation of system, theory research and nano-networks based on MC, the status of current research and development of MC was summarized and analyzed, in addition, future research trends was prospected.

Key words: molecular communication; bio-inspired; nano-machine; nano-network; propagation of information molecule

1 引言

近年来, 快速发展的纳米技术为工程领域研究与开发纳米尺度(1~100nm)尺寸的设备提供了有力工具。笔者将由纳米尺度尺寸的组件组成、整体尺寸在纳米尺度或微米尺度范围内、能够执行计算、数据存储、感知和驱动等任务的设备称为纳米机器(nano-machine)^[1,2]。纳米机器被认为是纳米尺度上

最基本的功能设备^[3]。由于个体纳米机器仅能在有限的空间范围内执行非常简单的任务, 因此为了能够在更大的范围上完成更复杂的任务, 需要纳米机器之间通过信息共享, 以合作的方式组成分布式的纳米网络(nano-networks)^[1,4]。纳米网络具有广阔的应用前景, 尤其在生物医学领域中, 例如体域纳米网络^[5](body area nano-networks)。纳米网络技术的发展将奠定未来研究与开发纳米尺度互联网

收稿日期: 2012-09-21; 修回日期: 2013-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61100007, 61073182); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(HEUCF100602); 黑龙江省自然科学基金资助项目(F201246); 美国国家科学基金资助项目(0842323, 0842324); 国家留学基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61100007, 61073182); The Fundamental Research Funds of the Central Universities(HEUCF100602); The Natural Science Foundation of Heilongjiang Province(F201246); U.S. National Science Foundation(0842323, 0842324); The Foundation Under the State Scholarship

(nanoscale Internet)^[2]和纳米物联网(Internet of nano-things)^[6]的基础。

传统的通信技术(例如电磁波或声波)由于受到收发器体积和能耗等因素的制约而无法直接应用于纳米机器^[1]。自然界中目前存在着各种数量巨大的“生物纳米机器”(例如细胞),它们能够通过传输分子的方式实现信息交换^[7],合作地组成稳定高效的生物纳米网络^[8]。这些经过数十亿年进化的天然纳米机器及系统为工程领域设计与开发纳米机器和纳米网络提供了参考模型^[9]。由于不受收发器的体积和能耗等因素的制约^[10],并且适用于许多特定的应用环境中(例如人体内),因此学术界普遍认为基于生物启发的分子通信是实现纳米网络最可行的通信技术之一^[3]。作为现有通信系统在纳米尺度的补充^[1],目前分子通信已经吸引了相关学术科研领域的广泛关注,例如,2011年成立的IEEE P1906.1标准工作组(IEEE COM/Nanoscale and molecular communications working group)正在开展分子通信的基本定义、概念模型、通用术语和协议的标准化工作,将有力地推动分子通信技术的发展与应用推广。

本文首先系统地归纳分子通信的定义、特性及基于分子通信纳米网络的应用领域,并列举国内外相关的重要学术活动与科研项目;然后详细地介绍分子通信的系统结构,其中重点阐述基于生物启发的信息分子传输机制;最后从系统的设计与实现、理论研究和基于分子通信的纳米网络技术3个方向总结和分析分子通信的研究与发展现状,并展望未来的研究方向。

2 分子通信的概述

2.1 分子通信的定义

分子通信的原理与机制来源于自然界中的纳米尺度生物通信过程,本文从通信工程技术的角度归纳出基于生物启发的分子通信的定义。

分子通信(molecular communication)是一种使用生物化学分子作为信息载体的短距离通信技术^[11],信息的载体分子被称为信息分子(information molecules)^[8]。在分子通信系统中,由信息的发送方纳米机器(简称发送器)生成能够被接收方纳米机器(简称接收器)识别并接收的信息分子,并基于信息分子的物理或化学特性编码信息^[1,12]。发送器释放的信息分子通过流体(液体或气体)介质^[3]被传送到接收器后,由接收器接收并以特定的方式解码信息,例如

通常将触发化学反应的过程看作是自然界中的生物纳米机器(例如细胞)对编码了化学状态等信息的信息分子的解码^[12]。

2.2 分子通信的特性

通过与传统通信技术及新兴的量子通信技术进行对比,能够系统地描述分子通信的关键特性。

1) 与传统通信技术的对比^[11,13]

分子通信与基于电磁波或声波的传统通信技术之间存在许多差异,如表1所示。

表1 分子通信与传统通信技术的特性对比

通信特性	分子通信	传统通信
信息载体	分子	电磁波或声波
信号类型	化学信号	电磁或声信号
传输介质	液体或气体	空间或线缆
噪声源	介质中的粒子或化学反应	电磁场或其他信号
传输速度	nm/s 或 $\mu\text{m/s}$	光速或声速
传输距离	nm~m	m~km
信息内容	化学状态或数字信息	文本、视频或音频
通信能耗	低	高

2) 与量子通信技术的对比

量子通信是一种基于量子力学的基本原理、以量子态作为信息载体的通信技术^[14]。目前分子通信的研究主要关注于细胞和分子级的通信机制与特性,尽管与量子通信存在本质区别,但是未来在原子或亚原子空间中开展分子通信的进一步研究将同样需要以量子力学原理作为基础^[15,16]。

3) 分子通信的其他特性

随机性:粒子的无规则布朗运动、温度或PH的变化以及环境中的化学反应等因素使信息分子在传输过程中可能出现不可预测的行为^[17](例如随机分解与降解)。

信息承载量大:特定类型的信息分子可以承载大量信息,例如大肠杆菌的染色体(一种信息分子)在 $2\mu^2$ 区域可以存储9.2Mbit的信息,而硅基技术在相同区域上仅能存储490bit的信息^[13]。

生物兼容性^[18]:生物启发的分子通信机制使纳米机器能够直接与生物系统中的各种原生组件(例如细胞、组织和器官)进行相互作用。

高效能:分子通信系统可以从环境中的化学反应中获取充足的能量^[19],以支持信息传输。同时自

然进化也形成了对能量利用的高效性,例如肌球蛋白(一种运载信息分子的工具)能够以接近 100%的效率使用化学能进行机械作业^[20]。

2.3 应用领域

分子通信的研究意义将主要通过纳米网络的应用得到体现。基于分子通信的纳米网络在生物医学、工业、军事和环境等诸多领域具有广阔的应用前景。

1) 生物医学领域: 由于在组件体积、生物兼容性和生物稳定性等方面具有突出的优点,因此基于分子通信的纳米网络能够为医学领域提供低侵入性的微创医疗技术^[21],例如,被移植到人体中的纳米传感器网络能够在分子尺度上提供对组织或器官的高分辨率感知,进而实现对疾病的早期诊断和预防;由纳米传感器与纳米执行器组成的纳米体域网能够实现对外来元素或病原体的识别与控制、对恶性细胞(例如癌细胞)的定位并作出相应反应^[5],从而有力地支持人体的免疫系统功能。精确的分子传输机制还有助于协调和控制药物的释放时间与剂量,实现嵌入人体的智能药物容器与特定细胞之间的定向药物投送^[13],能够为治疗代谢疾病(例如糖尿病)或缓解神经变性疾病(例如老年痴呆症)提供有效的帮助。

2) 工业领域: 基于分子通信的纳米网络能够被应用于食品质量和水质的监控过程中^[11],例如,纳米传感器网络能够检测到使用传统感知技术无法检测的微小细菌或有毒物质;此外在新材料的加工过程中^[1],通过将纳米网络嵌入到纤维材料内可以获得更先进的智能材料。

3) 军事领域: 基于分子通信的纳米网络能够被应用于核生化(NBC)的监测与防御^[1],或被应用于设计与制造先进的伪装设备和军服(例如,自调节温度或检测士兵伤情)^[18]等用途。

4) 环境领域: 生物启发的纳米网络可以解决许多目前技术无法解决的环境问题,例如生物降解^[21]、生物多样性控制^[1]和空气污染监控等。

除此之外,分子通信还能够许多其他领域中发挥重要作用。例如,分子通信技术通过提供生物分子计算设备^[13,17](例如酶晶体管、生物逻辑门和生物存储器等)之间的信息互联方式,能够增强系统的功能架构^[11],进而更充分地发挥设备的并行计算潜力以及针对特定问题的处理速度和体积优势。另外分子通信技术还可以被应用到片上实验室(lab-on-a-chip)^[22],通过直接并精确地操纵样本中的分子,实现在一块芯片(mm~cm)上对医学生物样本进行检测与分析。

2.4 重要的研究活动与科研项目

分子通信的概念于 2005 年被提出^[23],目前在国际上已经成为受到相关学科领域、科研机构和政府部门广泛且高度重视的研究课题,例如,美国国家科学基金(NSF)在 2008 年举办了分子通信技术研讨会^[24],并开始资助相关研究项目。表 2 列举了近年来与分子通信相关的主要国际会议。

国际上目前致力于分子通信技术研究的学术机构主要包括美国佐治亚理工学院和加州大学欧文分校、日本大阪大学前沿研究中心、西班牙加泰罗尼亚理工大学和土耳其中东科技大学等,表 3 列举了由这些机构承担的重要科研项目。此外美国橡树岭国家实

表 2 分子通信领域的主要国际会议

会议名称	时间	地点
7th International Conference on Body Area Networks	2012	奥斯陆(挪威)
2nd IEEE International Workshop on Molecular and Nano-Scale Communications	2012	渥太华(加拿大)
1st IEEE International Workshop on Molecular and Nano-Scale Communications	2011	上海(中国)
International ICST Conference on Nano-Networks	2011	亚特兰大(美国)
Workshop on Nano, Molecular, and Quantum Communications at IEEE ICCCN'09	2009	旧金山(美国)
NSF Workshop on Molecular Communication/Biological Communications Technology	2008	阿灵顿(美国)
2nd Workshop on Computing and Communications from Biological Systems at BIONETICS	2008	兵库县(日本)
1st Workshop on Computing and Communications from Biological Systems at BIONETICS	2007	布达佩斯(匈牙利)
International Symposium on Molecular Communication Technology	2006	大阪(日本)
Workshop on Molecular Communication	2005	兵库县(日本)

表 3 分子通信领域的重要科研项目

项目名称	支持与资助	研究内容	网址
Molecular Communication	DARPA; NSF; NICT	信息分子传输及处理机制	http://netresearch.ics.uci.edu/mc/
Molecular Nano-Communication Networks	NSF	分子/纳米尺度信息论与纳米网络协议	http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/monaco/
Molecular Communication and Networking Research	MEXT; Microsoft Research	分子通信系统设计与纳米网络技术	http://www.wakate.frc.eng.osaka-u.ac.jp/tnakano/
Nano Communication Networks	NSF	分子信道模型与通信协议	http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/nanos/
Nano-Networking	NSF	分子通信系统及仿真工具	http://www.n3cat.upc.edu/index
Molecular Communication for Particulate Drug Delivery System	Samsung SAITGRO	信息分子传输机制	http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/actionpotential/
Nano-Scale and Quantum Communications	IBM Faculty Award; TUBA-GEBIP	系统设计、信道建模及分子信息论	http://home.ku.edu.tr/~nwcl/nanoquantum.html

注：NICT-日本信息通信技术研究院；MEXT-日本文部科学省；TUBA-土耳其 79D1 学院。

验室、爱荷华大学、澳大利亚悉尼大学、日本国立情报通信研究所和 NTT DoCoMo 研发中心、加拿大多伦多大学、约克大学、爱尔兰沃特福德理工学院等学术机构在分子通信领域的研究也取得了很大的进展。

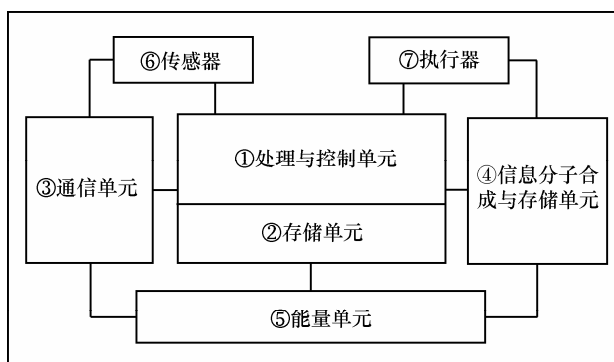
中国目前也已经开始重视分子通信及相关领域的研究与发展，例如在 20 世纪 90 年代，中科院已经开始进行细胞分子机器的设计与装配研究。目前，国内的一些高校和科研院所已经开始与国外的相关学术机构合作开展分子通信和纳米网络技术的研究工作。

3 分子通信的系统结构

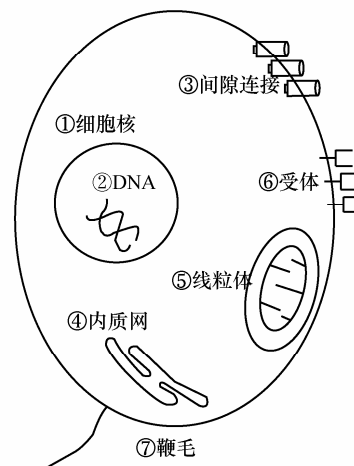
3.1 分子通信的系统组件

分子通信系统通常由以下基本组件构成。

1) 纳米机器。基于研发及制造能力的发展现状，目前主要通过将生物启发机制与仿生有机材料相结合的方式^[11]设计并实现具备简单计算、存储、感知、驱动及通信能力的纳米机器，例如人工合成的类细胞结构^[25]。根据文献[1]提出的模型，图 1 通过与生物纳米机器(活细胞)的对比说明了人工纳米机器的一般功能架构。纳米机器的主要功能部件包括：①能够通过运行指令控制所有其他组件执行预定任务的处理与控制单元；②能够存储指令和数据的存储单元；③由能够发送和接收信息分子的收发器组成通信单元；④信息分子的合成与存储单元；⑤能够为所有其他组件供能(例如通过化学反应)的能量单元；⑥充当环境与纳米机器之间接口的传感器与执行器单元。



(a)人工纳米机器



(b)生物纳米机器

图 1 人工纳米机器和生物纳米机器的功能架构对比

随着相关技术的快速发展，可以预见未来将能够实现更先进(例如有机与无机材料结合^[2])的纳米机器。根据生物的启发原理，理想的纳米机器还将具备以下的基本功能^[1,2]：①能够同时执行不同任务

的多任务功能；②能够同时使用多种分子传输机制进行通信的多通信接口功能；③能够在无外界干预的条件下将一些无序的元素组成有组织结构的自装配功能；④能够在无外界干预的条件下使用外部元素复制自身的自复制功能。多任务和多通信接口功能有助于增强纳米机器所执行任务的复杂性；自装配和自复制功能可以实现自主地创造大量的纳米机器，有助于提高纳米机器所执行任务的规模性。

2) 信息分子：用来编码信息的功能分子，与传统通信技术中信息分组的功能相同^[13]。信息分子需要具备对环境噪声和干扰的化学稳定性与顽健性。常用的信息分子包括蛋白质分子^[11]、细胞内信使分子(例如 Ca^{2+})^[26]、DNA/RNA 分子^[13]、神经递质^[9]、内分泌荷尔蒙分子^[11]和信息素分子^[27]等。

3) 运输分子：包括能够承载并在化学能(例如三磷酸腺苷(ATP)水解)的驱动下运输信息分子的分子马达(具有运动活性的蛋白质大分子，包括驱动蛋白、动力蛋白和肌动蛋白)^[28]和细菌马达(由自身的鞭毛或纤毛产生动力的细菌)^[13]

4) 引导分子：①能够引导分子马达运动的蛋白质轨道，例如微管^[29]和微丝^[30](由微管蛋白或肌动蛋白组成的细胞骨架)；②能够调节信息分子传输的蛋白质通道，例如间隙连接^[19](连通相邻细胞的细胞质，用于交换分子的物理通道)；③能够驱使细菌马达向特定纳米机器运动的诱导剂分子(细菌沿环境中诱导剂分子的浓度梯度运动的特性被称为细菌的趋药性^[31])；④能够在纳米机器之间传递电化学信号的神经元细胞^[8]等。

5) 接口分子：能够在传输过程中隐藏信息分子的化学和物理特性^[32]，保护信息分子不受环境噪声干扰^[33]的分子容器(例如脂质囊泡)。

运输分子、引导分子和接口分子的使用为分子通信提供了信息分子传输的可靠性保证。

3.2 分子通信的过程

本文基于 Shannon 的通信模型^[34]建立了能够描述一般性通信过程的分子通信模型，如图 2 所示。

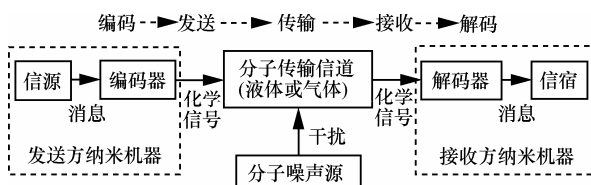


图 2 分子通信模型

分子通信的基本通信过程包括信息的编码、发送、传输、接收和解码 5 个主要步骤。

1) 编码是发送器将信源产生的消息翻译到能够被接收器检测到的信息分子上的过程。分子通信通常基于信息分子的类型、三维结构(例如蛋白质分子)^[18]、序列信息(例如 DNA/RNA 分子)^[13]、释放时间、数量(浓度)或浓度变化率^[3]等物理或化学特性编码信息。分子通信既可以实现数字通信系统中的信息编码机制(例如编码二进制信息)^[35]，也能够根据信息载体所具有的化学信号属性编码与化学状态或化学现象相关的功能性信息。

2) 发送是发送器将信息分子释放到传输介质中的过程。发送器可以通过打开能够向外扩散信息分子的通道(例如间隙连接)释放信息分子^[13]，或先将信息分子封装到接口分子中，然后借助运输分子和引导分子释放信息分子。

3) 传输是信息分子通过流体(液体或气体)介质从发送器被传送到接收器的过程。信息分子可以通过无化学能驱动的“被动传输”方式或有化学能驱动的“主动传输”方式进行传输。表 4 列举了 2 种传输方式的特征对比，基于生物启发的信息分子传输机制将在 3.3 节中进一步详细描述。

表 4 信息分子的被动传输与主动传输方式的特征对比

传输特征	被动传输	主动传输
信息分子的运动方式	扩散	定向运动
信息分子的运动机制	无化学能驱动和受环境因素影响	化学能驱动
平均传输延迟	高	低
信息分子的需求量	大量	少量
通信的可靠性	低	高
通信设施	不需要	运输分子、引导分子和接口分子
适用的环境	高度动态、不可预测或缺少通信设施	大信号分子
不适用的环境	大信号分子或拥塞环境(例如高粘度)	缺少通信设施

4) 接收是接收器检测到被传输的信息分子后对其进行接收的过程。接收器可以采用“配体—受体结合”机制^[18]接收信息分子(即由嵌入到细胞膜或接收器表面的能够识别并结合特定类型分子的受体蛋白捕捉信息分子)或通过打开分子通道(例如间隙连接)使信息分子进入接收器^[13]。

5) 解码是接收器通过被接收的信息分子重建(恢复)信源产生消息的过程。接收器可以根据被接收的信息分子解码数字信息。由于化学反应(例如酶级联反应)也能够被用来执行许多传统信息与通信系统所执行的复杂计算和决策功能^[1]，因此，纳米机器可以将信息分子中编码的与化学状态、现象或过程相关的信息解码成化学反应，进而通过化学反应驱动执行特定任务，例如合成新的信息分子、转发信号、存储数据或移动等。

3.3 信息分子的传输机制

根据信息分子传输距离的不同可以将分子通信分为短距(nm~ μm)通信、中距(μm ~mm)通信和长距(mm~m)通信^[4]；根据信息分子传输方式的不同可以将分子通信分为被动传输通信和主动传输通信。本节结合 2 种分类方式介绍主要的信息分子传输机制。

3.3.1 短距分子通信

能够实现短距分子通信的信息分子传输机制包括基于自由扩散的被动传输机制和基于分子马达的主动传输机制。

1) 基于自由扩散的被动传输机制。自由扩散是一种普遍的细胞内或细胞间的分子传输机制^[36]。基于自由扩散的分子通信在本质上是一种使信息分子向任意方向运动的广播通信方式^[37]。如图 3 所示，发送器向周围环境中释放信息分子，信息分子在经历无规则布朗运动的过程中创造了一个围绕发送器的浓度梯度，使发送器位置的浓度值最高。接收器装有特定类型的受体，仅当相应类型的信息分子以足够高的浓度出现在接收器的周围时，才会接收信息分子^[38]。

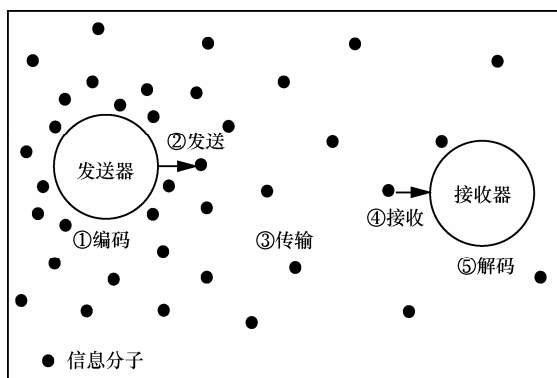


图 3 基于自由扩散的被动传输机制

2) 基于分子马达的主动传输机制。分子马达广泛地被用于细胞内的分子传输^[31]。在这种传输机制中，作为引导分子的微丝或微管通常从细胞的中心体出发，基于“动态不稳定性”(任意地伸长或收缩)

特性向细胞壁扩散，自组织形成星形或随机网络拓扑的引导分子网络^[29]。分子马达能够在化学能的驱动下以达到 400mm/d 的速度^[1]沿引导分子运动，通过提供了信息分子的定向传输机制实现单播或多播方式的分子通信^[39]。如图 4 所示，发送器合成接口分子(例如囊泡)，并通过特定的方式(例如芽生机制^[13])将封装了信息分子的接口分子结合到分子马达上。分子马达在化学能的驱动下沿引导分子运动，并能够通过转换到不同的引导分子上从而最终到达接收器。在接收器端，信息分子与分子马达分离(例如以囊泡融合^[39]方式)，并被接收器所接收。

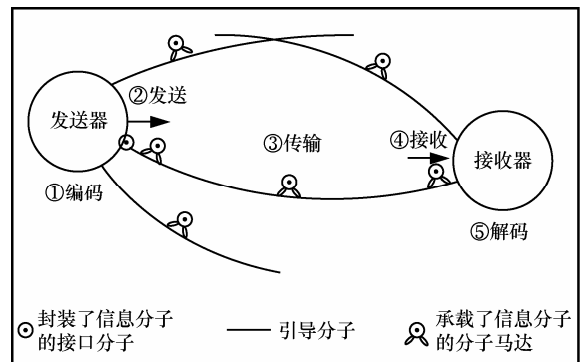


图 4 基于分子马达的主动传输机制

3.3.2 中距分子通信

能够实现中距分子通信的信息分子传输机制包括基于反应扩散的被动传输机制和基于细菌马达的主动传输机制。

1) 基于反应扩散的被动传输机制。间隙连接能够协调相邻细胞之间的行为，组成被称为“细胞线^[20]”的细胞网络。钙离子(Ca^{2+})是生物系统中最重要信息分子之一^[26]，通常被储存在细胞内特定的钙库(例如内质网，简称 ER)中。 Ca^{2+} 能够通过连接纳米机器的细胞网络实现较长距离的传输。如图 5 所示，发送器合成并释放初始化信号(例如被称为“钙激活分子”的三磷酸肌醇^[1]，简称 IP_3)，刺激邻近的细胞释放 ER 中的 Ca^{2+} 。 Ca^{2+} 通过间隙连接被扩散，依次刺激相邻细胞释放各自 ER 中的 Ca^{2+} (即钙诱导钙释放^[40]，简称 CICR)，使细胞网络内 Ca^{2+} 的浓度以正反馈的方式增加。当浓度增加到一定阈值时，细胞使用各种钙泵移除内部的 Ca^{2+} ，以负反馈的方式降低 Ca^{2+} 的浓度。由正反馈和负反馈组成的链式反应产生了细胞间 Ca^{2+} 的类波脉冲信号^[13]，使细胞网络能够不断地放大信号并以较高的频率实现信息传输^[41]。

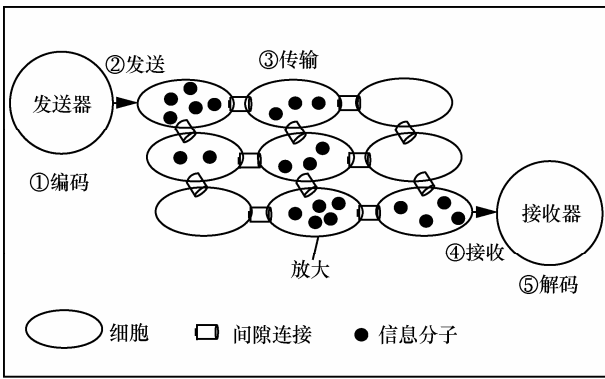


图 5 基于反应扩散的被动传输机制

2) 基于细菌马达的主动传输机制: 长期的进化使细菌具备了高效率的机械(例如能够产生动力的鞭毛和纤毛)和复杂的技能(例如趋药性使细菌能够向其认为具有最佳生存条件的位置运动^[42]), 另外通过“细菌结合”过程, 细菌能够吸附其他细胞并交换遗传物质(例如 DNA)^[13]。如图 6 所示, 发送器通过细菌结合过程将信息分子(例如 DNA 分子)装载到载体细菌中并释放载体细菌; 接收器通过释放诱导剂分子指示载体细菌的移动方向; 当载体细菌与接收器物理接触后, 通过细菌结合过程将信息分子传送到接收器。

3.3.3 长距分子通信

长距分子通信主要包括基于信息素、基于神经元和基于毛细血管的通信。信息素是仅能被同类的受体接收并引发特定行为的分子化合物^[1]。昆虫(例如蚂蚁、蜜蜂)或许多哺乳动物使用信息素在较长距离上传输信息。信息素通信在本质上属于基于自由扩散的被动信息分子传输机制^[27]。

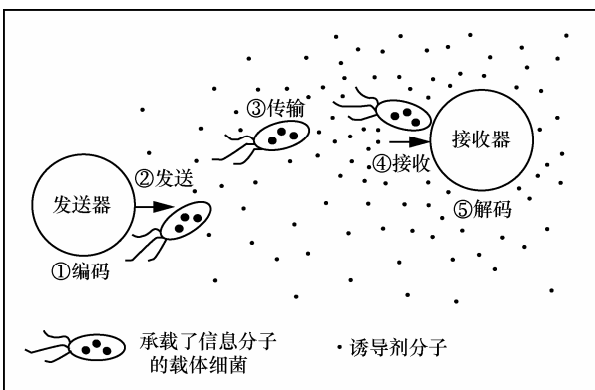


图 6 基于细菌马达的主动传输机制

基于神经元和基于毛细血管的分子通信以提供信号的物理传输链路方式实现“有线”的分子通信。神经元能够通过传输动作电位(沿神经元细

胞的轴突传输的电信号)和扩散神经递质分子(在神经元细胞的突触与其他神经元细胞的树突间自由扩散的化学信号)2 种形式相互转换地传输信息, 是现有速度最快的分子传输方式^[43]。神经元细胞具有基于神经突触自组织成网络的能力^[44], 且轴突的长度能够达到 1m。如图 7 所示, 由于纳米收发器能够通过神经元的郎飞结(髓鞘间大约 1 μm 长的空隙)作为接口连接到轴突^[43], 因此神经元细胞可以作为连接纳米机器的信息通路。

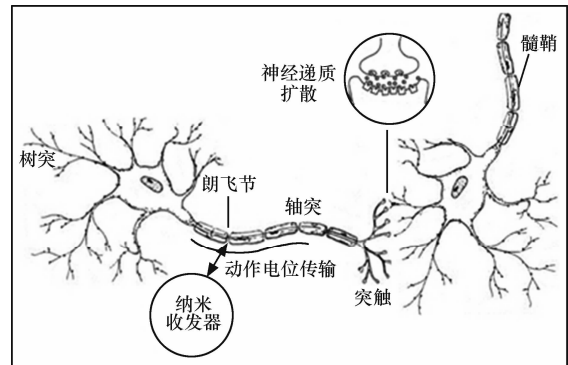


图 7 基于神经元的电化学信号传输机制

毛细血管是连接微动脉和微静脉的最细小血管(直径为 5~10 μm), 主要功能是实现血液与周围组织之间化学物质和营养物质的交换。基于毛细血管中的血流传输信息分子(例如荷尔蒙)可以实现不同纳米机器之间长距离的信息传输^[28]。

4 分子通信的研究与发展现状

分子通信是涉及生物学(主要包括分子生物学、系统生物学和合成生物学)、化学、物理学、计算机科学、通信工程和电子工程等学科交叉研究领域。目前的主要研究方向包括: 分子通信系统的设计与实现、分子通信的理论研究和基于分子通信的纳米网络技术, 即分别从通信工程、信息论和计算机网络 3 个方向论证和研究具有实用性的分子通信技术。

4.1 分子通信系统的设计与实现

作为全新的通信技术, 分子通信的研究重点是设计和实现能够满足通信工程领域需求的通信系统, 包括能够以精确和高效的方式实现发送、传输和接收信息分子, 并处理相应信息的最优分子通信组件和信息分子传输系统。

4.1.1 纳米机器的设计与实现

目前, 纳米技术与合成生物学是推动研究与开发

纳米机器的最重要的基础学科。纳米技术能够制造和控制分子或原子尺度的物质。例如碳纳米管^[45]是一种重要的纳米材料，可以被用于制造多种电子元件，其中，碳纳米管晶体管和碳纳米管传感器^[46]相比硅基元件具有体积更小、处理速度更快等突出优势。另外在生物学领域中，碳纳米管能够实现与 DNA 或分子马达的结合^[2]，也可以被用于模拟神经元^[2]和实现向细胞内运输药物^[47]等功能，因此有助于开发多种分子通信系统的功能组件^[2]。合成生物学的目标是建立与传统计算机系统类似的、可编程实现预定功能的人工生物系统^[48]。目前不同的研究领域可以合作生产生物组件，例如 MIT 的 BioBricks 项目建立了工程化的生物部件标准库^[49]，为设计与实现具备复杂功能的纳米机器提供了丰富的生物组件模块。

在纳米尺度上，生物分子计算具有突出的优势^[2]，例如 DNA 计算通过将信息编码进生物化学符号序列中，使用这些符号执行运算操作^[50]。目前已经开发了多种 DNA 自动机模型^[51]。而酶计算是另一种生物分子计算模式。酶是生物化学反应中必不可少的催化剂，利用酶级联反应的双稳态性和对输入(刺激)的超敏感性可以研发基本的逻辑计算组件^[52]。DNA 计算和酶计算均有助于实现纳米机器的处理、控制及通信功能，并有助于开发分子通信协议^[53]。

基于以上相关基础学科及相应技术的发展，在目前或将来工程领域能够通过生物混合技术、自顶向下技术和自底向上技术制造纳米机器。

1) 生物混合技术也被称为湿技术^[1]，是一种基于生物启发机制并利用仿生有机材料开发纳米机器的技术。例如目前的生物纳米技术已经实现用脂质双分子层组成球形囊泡，通过将功能蛋白(例如受体蛋白或基因调控蛋白)和生物酶等化学成分嵌入到囊泡中，制造出能够合成并释放信息分子的发送器和接收信息分子并作出相应反应的接收器^[54,55]。生物混合技术是现阶段设计与开发纳米机器最可行的方法。

2) 自顶向下技术也被称为干技术^[27]，是一种通过缩小微设备(例如微电子设备和微机电系统)的尺寸开发纳米尺度设备和组件的技术。目前将这种技术应用到纳米机器制造仍处于早期阶段^[1]。

3) 自底向上技术也被称为分子装配技术，是一种通过将个体分子作为基本构件，基于“分子识别”原理排列组装成纳米机器的技术^[27]。目前这种技术已经能够制造具备简单的交换和记忆功能的纳米

结构^[1]，但更多相关研发工作仍以理论研究为主。可以预见未来将能够通过精确和可控的排列分子实现高效率地装配纳米机器。

4.1.2 分子传输系统的设计与实现

1) 基于自由扩散的分子传输系统。由于无需额外的能量源和通信设施，因此这种分子传输系统具有简单且能够在较短距离上实现快速传输信息分子的优点。发送器可以通过选择特定类型的信息分子和设定信息分子浓度的方式选择目标接收器^[38]。另外由于信息分子易受传输环境的影响，因此通常需要使用接口分子封装信息分子，使其与环境隔离。文献^[32,33]提出了使用嵌入间隙连接蛋白的囊泡作为接口分子的方法，通过间隙连接与纳米机器接触，进而接收或释放信息分子。

2) 基于分子马达的分子传输系统。研究证明，通过将微管种子嵌入到发送器^[29]，利用微管的动态不稳定性可以自组织形成连接发送器与接收器的轨道网络^[39]。沿微管网络运动的分子马达能够为信息分子提供可靠的定向传输机制，且具有传输速度较高、信息分子需求量较少的特点。目前的生物纳米技术能够从细胞中提取马达蛋白，最近的研究已经在试管内建立了这种传输机制^[13]，实验表明微管的长度可以超过 $40\mu\text{m}$ ^[29]。

微管网络的拓扑排列方式是这种传输系统的主要研究挑战，文献^[29]受微管固有的动态不稳定性行为的启发，提出了利用微管的聚合和解聚，以自组织方式建立微管网络的方法，并利用分子马达与微管之间的相互作用进一步重组已经形成的微管网络，从而改善通信性能。由于难以排列微管的极性(微管的正端或负端)，文献^[56]提出了颠倒微管和分子马达的布局，使用在马达蛋白上滑行的微管作为信息分子载体的方法，从而避免了微管排列过程中的技术难点。目前类似的系统已经在人工环境中得到广泛研究，例如研究可以成功地控制微管蛋白在预置的显微光刻轨道网络上的划动方向^[57,58]，使这种受控的系统可以为分子通信提供可靠的信息分子传输方式。

能够无外部干预地装载和卸载信息分子是实现分子马达传输系统的重要基础。配体—受体结合机制能够精确地将信息分子装载到分子马达上^[1]。文献^[33]和文献^[56]则提出了通过将短 ssDNA(单链 DNA)连接到微管上，并使被连接到信息分子上的长 ssDNA 与微管所连接的短 ssDNA 类型相同且与接收器所

连接的长 ssDNA 在基对序列上完全互补, 进而利用 DNA 杂交技术实现信息分子的自主装载与卸载的方法。

3) 基于反应扩散的分子传输系统。文献[20]通过实验证明了使用间隙连接将细胞排列成连接不同纳米机器的通信网络的可行性。文献[59]基于 CICR 过程设计了能够放大被传输的分子信号的细胞中继器。目前已经发现超过 20 种的间隙连接蛋白, 不同的间隙连接蛋白能够组成具有不同分子渗透性和选择性的通道^[13], 并可以根据各种内部和外部因素改变这些特性^[13], 例如 Ca^{2+} 浓度、膜电势、温度或 PH 值, 进而形成对信号的过滤和交换功能, 控制或调节信息分子的传输方向和传输距离。因此, 通过采用编码初始化信号分子(例如 IP_3)的方法调制 Ca^{2+} 波, 反应扩散机制能够提供更灵活的信息传输方式^[1], 实现在相对小的时间跨度上较长距离的分子通信。

4) 基于细菌马达的分子传输系统。由于每一种细菌都能对特定的诱导剂作出反应并能够与其他细胞(纳米机器)交换遗传物质(信息分子), 因此细菌马达作为一种良好的分子传输机制得到了广泛研究^[60,61]。目前的研究大多使用无害且已知完整基因组序列的大肠杆菌(E.coli)。文献[4]分别提出了基于细菌马达和基于催化纳米马达的 2 种分子通信系统。前者将基因改造过的细菌存储在网关节点中, 基于生物学领域广泛研究的质粒、噬菌体或人造细菌染色体等方法在细菌结合过程中将 DNA 分组(编码了信息的 DNA 分子)插入到细菌的细胞质中。当载体细菌在诱导剂的作用下到达接收器并与之结合后, 接收器使用限制性内切酶或采用 DNA 杂交技术从质粒中提取 DNA 分组。与细菌马达类似, 催化纳米马达(铂金纳米棒)能够通过催化环境中的化学能运输信息分子。催化纳米马达需要过氧化氢水溶液环境, 并在预设磁场的引导下运动, 因此适合于生物体外的应用。文献[42]提出了使用 DNA 处理器(DPU)编码与解码信息分子, 并在细菌结合过程中实现对信息分子的封装与解封的细菌马达传输技术。

5) 长距分子传输系统。基于神经元的分子通信系统具有传输距离长、速度快、低衰减和传输电化学信号等优点^[8,27]。目前相关领域已经对神经元通信的特性进行了大量的研究, 例如电化学信号传输机制^[62]、神经元网络的连通性与拓扑结构等。使用神经元细胞作

为分子通信组件需要具备能够人工调用和抑制神经元信号, 以及能够最小化信号间干扰的调度机制。文献[43]设计了可以激活跨膜离子信号传输的纳米设备与神经元细胞之间的接口, 并根据神经元具有的“不应期”(即无信号传输时段)的特性, 提出了 TDMA 传输调度机制, 以保证由多个设备发送的信号能够在最小干扰下成功到达接收器, 并实现与神经元上生物信号之间无冲突的并行传输。文献[27]深入地讨论和研究了基于信息素和毛细血管的信息分子传输系统中的关键问题, 例如通信模型的建立和系统的拓扑结构等。

综上所述, 目前已经建立了多种分子通信系统的概念模型和基本框架, 但是还处在研究的早期阶段, 尤其是许多生物通信过程还没有被完全理解, 因此仍存在许多挑战, 主要包括: 1) 简单的纳米机器还不具备复杂的信息处理与控制能力, 不能精确地修改信息分子以编码信息及精确地控制信息分子的释放与接收; 2) 缺少有效的传输控制机制, 例如控制分子马达的运动、细胞网络对信号的放大和过滤、载体细菌的活动等; 3) 缺少对降低随机性对通信的影响和扩大通信距离等能够有效地改善通信性能的方法的深入研究。

4.2 分子通信的理论研究

随着相关研究的不断深入, 学术界已经开始重视分子通信理论基础的建立。分子通信的理论研究目标是从通信原理的角度研究并分析分子通信系统中信息传输的特征规律, 进而确定通信性能(信道容量)并探索提高通信质量的方法, 最终建立完善的分子(纳米尺度)信息论^[2,8]。现阶段的研究核心是围绕不同的编码与调制技术开展分子通信的信道特征化及噪声建模的研究。

4.2.1 编码与调制技术

目前在分子通信系统中, 主要被研究和使用的信息编码与调制技术包括以下 5 个方面。

1) 基于分子类型的编码。这种编码技术使用不同类型的信息分子代表不同的比特值^[18]。接收器基于相应受体的反应(配体—受体结合)判断被发送的信息。文献[63]进一步提出了基于不同类型信息分子的传输顺序编码比特值的方法。

2) 基于分子浓度的编码。这种编码技术类似于传统通信系统中的振幅调制(AM)技术^[64], 使用信息分子的不同浓度级代表比特“0”和“1”^[65,66]。接收器通过测量所接收信息分子的浓度值, 并与预定的阈值

进行对比后确定被发送的比特值^[67]。

3) 基于分子浓度变化率的编码。这种编码技术类似于传统通信中的频率调制(FM)^[68]技术,使用信息分子的浓度变化率(浓度 C 的时间导数 $dC(t)/dt$)代表不同的符号^[69,70]。文献[68]提出了基于分子电路的具备频率选择能力的解码方案。

4) 基于分子释放时间的编码。这种编码以信息分子被释放的时间代表比特值^[71,72],前提条件是纳米机器需要具备精确的时钟同步机制^[73]。

5) 基于分子结构序列的编码。与目前在计算机通信系统中所广泛使用的二进制信息编码方式不同,纳米机器将能够基于 DNA 的核苷酸(腺嘌呤、胸腺嘧啶、胞嘧啶和鸟嘌呤)序列实现四进制信息编码技术^[4,74]。这种编码技术通过承载大量的信息而提高信道的吞吐量^[56],并具有良好的抗噪性^[75]。文献[4]和文献[42]详细地描述了基于 DNA 序列编码信息和分组封装的基本方法。

4.2.2 信道的特征化

分子通信的信道特征化目标是建立信息分子或信息分子载体在流体传输环境中的动力学模型,通过获得的模型量化分析信道的平均传输延迟、抖动和分组丢失率等相应的通信特征。生物物理学等相关领域已经开发了大量从量子、分子到细胞和器官级的动力学模型和计算模型,这些模型为分子通信的理论研究奠定了基础。

扩散是信息分子运动的重要形式,因此扩散信道是分子通信的研究重点。根据信息分子的运动特征,通常将扩散信道分为自由扩散信道、反应扩散信道和漂移扩散信道3种类型。

1) 自由扩散是在无化学反应作用的情况下,信息分子从高浓度区域向低浓度区域运动,最终达到浓度均匀状态的过程。自由扩散是一种最基本的信息分子运动方式,包括细胞内信使分子、信息素和神经递质在内的许多种类的信息分子及细菌的诱导剂粒子均依靠这种方式进行传输,而且基于分子类型、基于分子浓度或浓度变化率的编码都是主要应用于自由扩散信道的编码技术。自由扩散信道的特征化研究目前主要通过 Fick 定律描述信息分子的扩散过程^[3,69],并通常将分子运动建模为低雷诺数运动^[76](雷诺数是用来量化特定流量条件下惯性力与粘性力的相对重要性的无量纲数^[77],流体环境中的分子受到的粘性力大于惯性力)。相关研究表明自由扩散信道的平均传输延迟受到发送器与接收

器之间距离的极大影响(随距离的平方增长)^[13],另外,扩散系数^[66]和环境温度^[71]等因素也会影响到信道的特征。

2) 反应扩散是一种能够通过化学反应放大分子信号(增加被传输信息分子的数量)的扩散过程^[19]。基于间隙连接的细胞网络主要依靠反应扩散方式增加 Ca^{2+} 通信的可靠性。在针对 Ca^{2+} 信号传输的传统理论研究中,通常基于对常微分方程进行数值积分描述 Ca^{2+} 的时间动力学特性,并通过偏微分方程特征化 Ca^{2+} 的空间动力学特性^[78]。而能够更精确地分析随机效应的随机仿真方法(例如 Gillespie 随机仿真算法)也已经被应用于细胞网络中 Ca^{2+} 信道的特征化研究中^[78]。相关研究表明反应扩散信道的传输延迟能够随放大器数量的增加而降低,同时也能够随被放大器释放的分子数量的增加而降低^[12]。

3) 漂移扩散是信息分子随方向性漂移被连续传输的过程^[71],例如荷尔蒙随血流被传播到分布在人体内的目标细胞。漂移扩散信道的特征化需要充分考虑流体介质的速率因素^[79]。相关研究证明漂移扩散是长距离传输信息分子的有效方式,传输延迟和抖动随漂移速率的增加而降低^[12]。

针对其他类型分子信道的特征化研究还包括:

①建模低雷诺数环境中载体细菌的有偏随机行走过程^[42]。由于鞭毛能够在化合物能量的驱动下,通过顺时针或逆时针旋转推动细菌以一系列的定向游动和翻滚所组成的运动过程向接收器移动^[74]。因此信道的特征化需要量化细菌运动的控制参数,包括旋转方式、定向游动和翻滚的距离、方向变化^[77]及诱导剂的扩散过程^[74]等;②由于分子马达以比较有规律的方式运动,因此通信过程更具确定性,通常以仿真方法研究其信道特征^[80],重点是抽象分析信息分子的装载与卸载过程^[81]、受力因素和环境中的化学反应因素^[82]等;③特征化神经元通信中的电信号与化学信号的转换过程。通常将输入与输出之间的关系假设为波尔兹曼分布^[83]。实验证明在时间域中,神经递质的浓度受动作电位的影响表现出矩形脉冲行为^[83]。

4.2.3 噪声建模

信息分子在传输过程中可能会经历各种非确定性因素的影响,例如分子间碰撞或与环境其他类型分子的化学反应及热噪声等,这些影响因素通常被描述为分子信道噪声。针对分子信道噪声的抽象研究首先需要个别化分析不同类型的噪声源,并以统计学方式提供对噪

声源建模的封闭表达^[70],然后以类似传统无线通信系统中的加性、乘性或其他不同特性的噪声进行分类和系统描述^[15]。

目前的噪声建模研究主要集中于分子扩散信道。针对基于分子浓度变化率编码的信道,文献[69,70]将由粒子的离散性和随机运动对信号的发送、传输和接收过程产生的噪声分别定义为粒子采样噪声、粒子计数噪声和接收噪声,并采用双重方式建立噪声模型,包括:1)根据物理、生物学和化学动力学原理,建立能够对噪声产生过程进行数学分析并包含所有相关物理变量的物理模型;2)根据由物理模型生成的数据,建立能够通过随机过程和相关统计参数捕捉噪声现象,分析总结噪声产生原因和特征的随机模型。文献[71]将基于分子释放时间编码的信道定义为加性逆高斯分布噪声信道,并建立了噪声模型。

另外,环境中积累的信息分子将对新的通信产生被称为“信道记忆”的干扰,文献[65]通过指数衰减法和接收器移除法减少了环境中过多的信息分子,文献[85]提出了使用降解酶分解冗余的信息分子,进而降低信道记忆干扰的方法。

生物系统对噪声和干扰具有高度的适应性和韧性,并能够利用噪声改善通信性能^[2],例如生物系统可以通过随机共振现象检测噪声环境中的弱信号,进而实现长距离通信^[86]。因此,分子通信的研究可以参考生物系统的噪声处理机制。

综上所述,目前的理论研究集中于开发基本的编码与调制技术,建立通信过程的描述与分析模型^[3]、信道特征化及信道容量分析模型^[87-93]和噪声模型等。仍存在的主要挑战包括:1)大多数模型相对简单且基于一些不实际的假设(例如发送器与接收器完全同步且无化学反应的影响),因此不能完全真实地抽象信道特征;2)将香农的信息论原理应用到纳米尺度通信仍有待讨论(例如量化流体信道中的信噪比存在一定的难度);3)基于主动传输方式分子通信的相关理论研究还较少。

4.3 基于分子通信的纳米网络技术

作为一种全新的网络技术,纳米网络具有如下特征:1)大部分或全部节点的体积及节点间距离需要以纳米计量,个体节点仅能执行非常简单的任务且节点数量巨大^[2];2)由于难以在纳米尺度对每个节点实施精确控制,理想的纳米网络需要具备自装配和自组织能力^[1];3)基于分子通信的特性,需要全新的网络协

议设计模式^[11];4)在许多应用环境(例如生物组织)中,节点是运动的^[1]。尽管硬件研发仍面临着许多挑战,但是在纳米网络的初期探索阶段,同步开展面向硬件和面向网络技术的研究工作是非常有益的。目前已经存在一些在网络规模或运行机制上与纳米网络具有相似特征的网络技术,基于对相关技术的理解和参考,并结合纳米网络的自身特征,学术界已经开始了纳米网络技术的研究。

4.3.1 相关的网络技术

无线传感器网络、片上网络和主动网络技术的发展在一定程度上奠定纳米网络的研究基础。

1) 无线传感器网络:由于无线传感器网络与纳米网络都是“资源受限”的分布式网络系统^[94],因此无线传感器网络能够为纳米网络技术提供研究参考。另外,许多应用需要传感器节点向体积更小化方向发展,例如医用纳米传感器^[95],说明纳米网络必然是无线传感器网络的发展方向之一。

2) 片上网络:随着更多组件能够被集成到同一芯片上,为了改善组件之间的互联或信息路由,片上网络提供了构建小尺度通信网络的先进技术^[2],成为纳米网络研究的重要推动力之一。

3) 主动网络:节点的自装配特性对纳米网络体系结构的建立产生了重要影响。主动网络是一种允许网络节点对数据分组执行自定义计算,具有自适应、动态和智能化特性的网络技术^[96],能够支持实现纳米网络的自装配或自进化机制^[2]。

4.3.2 纳米网络技术的研究进展

目前在纳米网络拓扑结构的建立和低层网络协议的开发等方面已经取得了初步的研究成果。

1)网络拓扑:稳健的网络拓扑结构对改善包含大量异构节点的纳米网络性能非常重要。文献[4]提出的分层拓扑结构由网关和纳米机器2类节点组成,每个网关负责管理若干纳米机器。纳米机器与网关之间采用自由扩散分子传输机制进行通信,网关之间基于细菌马达传输DNA分组实现信息交换。文献[44]基于生物免疫系统的启发提出了由移动纳米机器和信息站组成的ad hoc纳米网络(MAMNET),并采用受神经元启发的电化学通信机制实现信息共享。

2) 物理层技术:4.1节和4.2节已经分别讨论了纳米网络的物理层问题。另外分子通信系统与其他通信系统(例如电磁波)之间的通信接口也是需要探索的重要问题^[2]。神经元的电化学信号转换机制

可以作为不同通信系统接口的研究参考^[43]。未来具备多通信接口和相应信号转换机制的纳米机器可以实现分子纳米网络与其他类型网络系统(例如研发中的基于碳纳米管天线^[97]和太赫兹波段的电磁纳米网络^[95])之间的互联。

3) 链路层技术：链路层寻址、差错控制和同步机制是目前的研究重点。链路层寻址可以通过基于信息分子的种类^[36]、接收器释放特定类型的诱导剂^[31]、DNA 标签^[98]或定位接收器位置^[99]等方式实现。差错控制机制可以通过在 DNA 分子中增加附加编码序列实现差错校验与纠正^[50]；通过优化信息分子的发送速率最大化信息分子按序传输概率^[100]或最小化误差率^[93]；通过发送冗余分子提高信噪比并降低误差率^[65]等方式实现。“群体感应”是细菌通过释放并同时检测环境中的自诱导剂的浓度，确定周围同类细菌的数量并同步群体行为(例如形成生物膜)的机制，为纳米网络的节点同步机制提供了良好的研究模型^[61]。

4) 网络层技术：以多跳方式转发信息能够支持长距离的分子通信。文献[101]提出了基于细菌马达通信的纳米网络机会路由机制。但是目前网络层的研究多局限于静态路由表机制^[42, 91]，不适合网络节点的运动和网络条件的变化^[12]。文献[102]分别提出了基于 DNA 和基于体液免疫的数据库机制来存储地址信息，初步考虑了网络的动态性，能够作为实现动态路由系统的基础。

5) 节点定位：特定的应用(例如精确医疗技术)对节点定位技术提出了需求。与无线传感器网络相似，纳米网络也可以基于分子信号的特征实现测距及定位。目前已经提出了基于信号传输延迟^[103]和基于分子浓度或频率(浓度变化率)衰减^[104]的测距技术。文献[99]提出了基于一组锚节点建立坐标系，并通过测量相对于每个锚节点之间的距离确定纳米机器位置的方法。

6) 仿真工具：评估网络协议的性能需要适合的仿真工具。目前纳米网络专用的仿真工具还很少，例如 NanoNS 是基于计算机网络仿真器建立的纳米网络物理层仿真工具^[105]；由 MoNaCo 项目组(如表 3 所示)开发的 NanoSim 是一种开源的纳米网络仿真器，可以验证信号的衰减、延迟和噪声模型以及网络协议；N3Sim 是一种用于验证基于扩散的分子信道模型仿真框架^[106]。

综上所述，目前纳米网络的研究集中于论证网

络体系结构的发展方向和探索底层网络协议。由于极有限的节点计算与存储能力为纳米网络技术的研发带来了巨大的挑战，并且通信原理的差异也使许多传统无线网络的协议和算法无法被应用到纳米网络，因此如何基于网络特性构建合理的网络架构和系统，开发高效、实用和易扩展的网络协议，以及将拓扑管理、网络安全、数据融合与数据管理、资源优化等相关技术及应用拓展到纳米网络研究中是有待解决的重要问题。

5 结束语

基于生物启发的分子通信是一种全新的短距通信技术，能够克服传统通信技术在纳米尺度应用的缺点，为纳米机器提供高效可靠的信息交换方式，支持纳米网络执行更复杂的任务。本文从概念、特性、应用领域、系统组成和通信机制等方面对分子通信作出了深入归纳与详细描述，并着重剖析了分子通信的研究与发展现状和面临的主要挑战。目前，分子通信及相关领域的研究正处于起步阶段，综合研究现状与挑战，本文对未来分子通信总体的研究与发展趋势展望如下。

1) 设计与实现完善的分子通信系统。①进一步探索具有分布式网络特征的生物系统和机制(例如生物免疫系统和基因调控网络等)，确定更适合的生物/纳米材料，以分子电子学、NEMS 和生物/分子计算技术为基础并应用生物启发方法设计与实现分子通信的组件与系统及其与生物系统(例如细胞)和 IT 系统(例如传感器网络)之间的接口，并开展生理条件下的实验验证。②研发能够使纳米网络系统从环境中(例如人体内)收获具备高能效和低散热特征的能量源。③系统地开发信息分子的获取/合成、处理和回收的方式与方法。④设计不仅能够放大 Ca^{2+} 信号，还能够应用于其他类型信号的放大器/中继器；优化和拓展更具优势和挑战的分子马达传输系统，并设计基于多种传输方式的混合分子传输机制和更复杂的双向通信(目前的研究关注于单向通信)模式，以提高分子通信的效能。⑤模拟细菌在分子级的通信原理和趋药性机制研发可控的自推进信息分子载体。⑥研究基于生物启发的组件集成方法(例如自组织与反馈控制机制^[24])，并解决系统级问题(例如顽健性、稳定性)，基于系统工程理论构建分子通信的体系架构。

2) 深化理论研究：①研究与实现对环境噪声具

有顽健性并能够提高信息传输速率的编码技术,例如基于信息分子 3D 结构(例如蛋白质)的编码被认为是一种具有优势和挑战的编码技术。②为了增强信道特征模型的可应用性并最终建立完善的分子(纳米尺度)信息论,需要建立能够结合动力学特征(例如分子的运动和环境的变化)并扩展到多级尺度(例如分子、原子和亚原子)的、体现更微观的生物及物理结构所蕴含信息特征的数学模型和计算模型。③进一步优化已有的噪声与干扰模型,并基于生物启发方法开发分子信息的差错控制技术。另外生物系统的随机性本质也提供了理论分析与建模的研究空间。④研究相关基础理论与先进仿真技术的结合机制,开发标准化的建模和测试工具,将分子通信技术的研发工作从传统的生物学实验平台平移到高性能的计算机仿真平台上,为多学科领域共同探索分子通信技术提供有效的研发平台与工具。

3)构建基于分子通信的纳米网络:依托或结合较成熟的网络技术开展纳米网络的研究是一种可行的方法。例如结合无线体域网(WBAN)与纳米网络构建“体域纳米网络”,这样的网络既能够弥补由于低生物兼容性导致的 WBAN 规模较小的缺点,同时又可以通过采用“集中式处理”和“生物启发”的研究路线缓解由于纳米机器极有限的处理与存储能力所带来的研究挑战,实现高分辨率感知等医学应用。建议的研究方案包括:①设计双层网络拓扑结构(包括基于 IEEE 802.15.6 标准的汇聚节点层和基于分子通信的纳米网络层)、电化学信号转换机制和完整的网络协议栈模型。②开发适合于规划和控制数量巨大的纳米机器的网络拓扑管理机制,例如参考“群体感应”机制设计节点分簇算法。③开发轻量级网络协议,其中,适合分子信道的 MAC 协议、动态路由协议或协议的跨层设计是有待解决的问题,并基于底层协议设计能够实现可靠端到端信息传输的高层协议。④针对纳米网络具备的特定功能(例如基于分子诊断的异常检测^[46])开发应用层技术,例如由汇聚节点对纳米机器采集的数据进行数据融合等“在网处理”。此外,其他相关的纳米网络技术也需要适时开展讨论与研究。

未来的纳米网络能够广泛地应用于生产和生活中的诸多领域,有效地缓解中国目前在医疗卫生、工业、环境和国防建设等领域面临的巨大压力,对国家的可持续发展具有重要意义。由于分子通信

是实现纳米网络的重要基础,所以非常有必要在这个全新的科研领域中开展深入的研究与探索,自主开发新技术,并力争走在世界的前列。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, BRUNETT F, BLAZQUEZ C. Nanonetworks: a new communication paradigm[J]. *Computer Networks Journal*, 2008, 52(12): 2260-2279.
- [2] BUSH S F. *Nanoscale Communication Networks*[M]. Boston: Artech House Press, 2010.
- [3] PIEROBON M, AKYILDIZ I F. A physical end-to-end model for molecular communication in nanonetworks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28 (4):602-611.
- [4] GREGORI M. A new nanonetwork architecture using flagellated bacteria and catalytic nanomotors[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28 (4):612-619.
- [5] ATAKAN B, AKAN O, BALASUBRAMANIAM S. Body area nanonetworks with molecular communications in nanomedicine[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(1):28-34.
- [6] AKYILDIZ I F, JORNET J M. The Internet of nano-things[J]. *Wireless Communications*, 2010, 17(6):58-63.
- [7] LIU J Q. Molecular informatics of nano-communication based on cells: a brief survey[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 1(1):118-125.
- [8] DERYA M. Molecular communication nanonetworks inside human body[J]. *Nano Communication Networks*, 2012, 3(1):19-35.
- [9] FALKO D, OZGUR B A. A survey on bio-inspired networking[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(6):881-900.
- [10] NAKANO T. Biologically inspired network systems: a review and future prospects[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2011, 41(5):630-643.
- [11] SATOSHI H, YUKI M. Molecular communication:harnessing biochemical materials to engineer biomimetic communication systems[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 1(1):20-30.
- [12] NAKANO T, MOORE M J, WEI F. Molecular communication and networking: opportunities and challenges[J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2011, 11(2):135-148.
- [13] NAKANO T, MOORE M J. *Molecular Communication Technology as a Biological ICT*[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [14] 周并举, 刘小娟, 詹杰. 双光子通道中任意初态原子比特周期量子回声的调控[J]. *通信学报*, 2012, 33(3):177-182.
ZHOU B J, LIU X J, ZHAN J. Control of the periodical quantum echo of atom bit with arbitrary initial states in two-photon channel[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(3):177-182.
- [15] ALFANO G. On information transmission among nanomachines[A]. *Proc of Nano-Nets 06*[C]. Lausanne, Switzerland, 2006.1-5.
- [16] JALIL M A. Molecular transporter generation for quantum-molecular transmission via an optical transmission line[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 1(2):96-101.
- [17] HIYAMAM S. Molecular communication[A]. *Proc of NSTI Nanotechnology Conference*[C]. Boston, USA, 2005. 391-394.
- [18] NAKANO T. Molecular communication paradigm overview[J]. *Next Generation Information Technology*, 2011, 2 (1):9-16.
- [19] NAKANO T, SUDA T, KOUJIN T, *et al.* Molecular communication through gap junction channels[J]. *Transactions on Computational Sys-*

- tems Biology X, 2008, 54(10):81-99.
- [20] NAKANO T. Molecular communication through gap junction channels: system design, experiments and modeling[A]. Proc of 2nd BIONETICS[C]. Budapest, Hungary, 2007. 139-146.
- [21] YASIR M, ANJUM M. Molecular communication for nanoscale communication networks[A]. Proc of the 8th International Conference on Frontiers of Information Technology[C]. Islama-bad, Pakistan, 2010. 213-217.
- [22] MORITANI Y. Molecular communication for health care applications[A]. Proc of PERCOM 06[C]. Pisa, Italy, 2006. 549-553.
- [23] SUDA T. Exploratory research on molecular communication between nanomachines[A]. Proc of Genetic and Evolutionary Computation Conference[C]. Washington DC, USA, 2005. 27-31.
- [24] NAKANO T. NSF Workshop on Molecular Communication/Biological Communications Technology[R]. NSF Report, 2008.
- [25] SASAKI Y, SHIOYAMA Y. A nanosensory device fabricated on a liposome for detection of chemical signals[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2010, 105(1):37-43.
- [26] NAKANO T. Information transfer through calcium signaling[A]. Proc of Nano-Net'09[C]. Lucerne, Switzerland, 2009. 29-33.
- [27] GINE L P, AKYILDIZ I F. Molecular communication options for long range Nanonetworks[J]. Elsevier Computer Networks, 2009, 53(16):2753-2766.
- [28] MOORE M J, ENOMOTO A. A design of a molecular communication system for nanomachines using molecular motors[A]. Proc of PERCOM 06[C]. Pisa, Italy, 2006. 554-559.
- [29] ENOMOTO A, MOORE M J, SUDA T, *et al.* Design of self-organizing microtubule networks for molecular communication[J]. Nano Communication Networks, 2011, 2(1):16-24.
- [30] ENOMOTO A. A molecular communication system using a network of cytoskeletal filaments[A]. Proc of 9th Nanotechnology Conference and Trade Show[C]. Boston, USA, 2006. 725-728.
- [31] GAO Y L, LAKSHMANAN S, SIVALUMAR R. On attractant scheduling in networks based on bacterial communication[A]. Proc of 1st IEEE MoNaCom[C]. Shanghai, China, 2011. 419-424.
- [32] MORITANI Y, HIYAMA S, NOMURA S M, *et al.* A communication interface using vesicles embedded with channel forming proteins in molecular communication[A]. Proc of BIONETICS'07[C]. Budapest, Hungary, 2007. 147-149.
- [33] HIYAMA S. A biochemically-engineered molecular communication system[A]. Proc of NanoNet'08[C]. Boston, USA, 2009.85-94.
- [34] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3):379-423.
- [35] UPAL M. Characterization of intersymbol interference in concentration coded unicast molecular communication[A]. Proc of CCECE'11[C]. Ontario, Canada, 2011.164-168.
- [36] AKYILDIZ I F. Propagation models for nano communication networks[A]. Proc of 4th EuCAP[C]. Barcelona, Spain, 2010. 1-5.
- [37] EKFOR D A W. Microchannel molecular communication with nanoscale carriers: brownian motion versus active transport[A]. Proc of ICN-B'10[C]. Hong Kong, China, 2010. 854-858.
- [38] THOMAS P J. The diffusion mediated biochemical signal relay channel[A]. Proc of NIPS'03 [C]. Vancouver, Canada, 2003.1-8.
- [39] MOOREM J, ENOMOTOA. Molecular communication: unicast communication on a microtubule topology[A]. IEEE International Conference on SMC'08[C]. Singapore, 2008.18-23.
- [40] BERRIDGE M J. The AM and FM of calcium signaling[J]. Nature, 1997, 386(6627):759-760.
- [41] VERKHRATSKY A. Calcium signaling in glial cells[J]. Trends in Neurosciences, 1996, 19(8):205-212.
- [42] COBO L C. Bacteria-based communication in nanonetworks[J]. Nano Communication Networks, 2010, 1(4):244-256.
- [43] BALASUBRAM S, NOREEN T. Development of artificial neuronal networks for molecular communication[J]. Nano Communication Networks, 2012, 2(2):150-160.
- [44] GUNAY A, ATAKAN B. Mobile ad hoc nanonetworks with collision based molecular communication[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 11(3):353-366.
- [45] YOSHIKAZU H. Growth of suspended carbon nanotube networks on 100-nm-scale silicon pillars[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(12): 2261-2263.
- [46] SIAVASH G, FARSHAD L, ALI M. Carbon modeling and analysis of abnormality detectoin in biomolecular nano-networks[J]. Nano Communication Networks, 2012, 3(4):229-241.
- [47] BIANCO A. Applications of carbon nanotubes in drug deliver[J]. Current Opinion in Chemical Biology, 2005, 9(6):674-679.
- [48] WEISS R. Synthetic biology: from bacteria to stem cells[A]. Design Automation Conference[C]. San Diego, USA, 2007. 634-635.
- [49] RON W, SUBHAYU B. Genetic circuit building blocks for cellular computation, communications, and signal processing[J]. Natural Computing, 2003, 2(1):47-84.
- [50] WALSH F, BALASUBRAMANIAM S. Hybrid DNA and enzymatic based computation for address encoding, link switching and error correction in molecular communication[A]. Proc of 3rd Nano-Net[C]. Boston, USA, 2008. 28-38.
- [51] BENENSON Y. An autonomous molecular computer for logical control of gene expression[J]. Nature, 2004, 429(6990):423-429.
- [52] STETTER M, SCHURMANN B. Logical nanocomputation in enzyme reaction networks[A]. Proc of 1st BIONETICS[C]. Lugano, Switzerland, 2006. 1-7.
- [53] FRANK W, BALASUBRAM S. Synthetic protocols for nano sensor transmitting platforms using enzyme and DNA based computing[J]. Nano Communication Networks, 2010, 1(1):50-62.
- [54] DOKTYCZ M J, SIMPSON M L. Nano-enabled synthetic boilogy[J]. Molecular Systems Biology, 2007, 3(125):1-10.
- [55] MUKAI M, MARUO K. Propagation and amplification of molecular information using a photo-responsive molecular switch[J]. Super Molecular Chemistry, 2009, 21(3):284-291.
- [56] HIYAMA S, ISOGAWA Y, SUDA T, *et al.* A design of an autonomous molecule loading/transporting/unloading system using DNA hybridization and bio-molecular linear motors[A]. Proc of ENS' 05[C]. Paris, France, 2005. 1-6.

- [57] HIRATSUKA Y, TADA T. Controlling the direction of kinesin-driven microtubule movements along micro lithographic tracks[J]. *Biophysical Journal*, 2001, 81(3):1555-1561.
- [58] FARSAD N. Quick system design of vesicle based active transport molecular communication by using a simple transport model[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 2(4):175-188.
- [59] NAKANO T. Repeater design and modeling for networks[A]. Proc of 1st IEEE MoNaCom[C]. Shanghai, China, 2011.501-506.
- [60] ARIFLER D. Link layer modeling of bio-inspired communication in nanonetworks[J]. *Nano Communication Networks*, 2011, 2(4):223-229.
- [61] ABADAL S, AKYILDIZ I F. Automata modeling of quorum sensing for nano communication networks[J]. *Nano Communication Networks*, 2011, 2 (1):74-83.
- [62] KOTSAVASIOLOGLOU C. Modeling signal transmission and robustness in biological neural networks[A]. Proc of MABE'08[C]. Acapulco, Mexico, 2008. 80-85.
- [63] ATAKAN B, GALMES S, AKAN O B. Nanoscale communication with molecular arrays in nanonetworks[J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2012,11(2):149-160.
- [64] MOHAMMAD U M. On the characterization of binary concentration-encoded molecular communication in nanonetworks[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 1(4):289-300.
- [65] MOORE M J, SUDA T, OIWA K. Molecular communication: modeling noise effects on information rate[J]. *IEEE Transaction Nanobioscience*, 2009, 8 (2):169-180.
- [66] KURAN M S, YILMAZ H B. Interference effects over modulation techniques in communication via diffusion system[J]. *Nano Communications Networks*, 2012, 3(1):65-73.
- [67] ATAKAN B, AKAN O B. An information theoretical approach for molecular communication[A]. Proc of BIONETICS'07[C]. Budapest, Hungary, 2007. 33-40.
- [68] CHOU C T. Molecular circuits for decoding frequency coded signals in nano-communication networks[J]. *Nano Communications Networks*, 2011, 3(1):46-56.
- [69] MASSIMILIANO P, AYILDIZ I F. Diffusion-based noise analysis for molecular communication in nanonetworks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(6):2532-2547.
- [70] MASSIMILIANO P. Noise analysis in ligand-binding reception for molecular communication in Nanonetworks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(9):4168-4182.
- [71] SRINIVAS K V, ADVE R S. Molecular communication in fluid media: the additive inverse gaussian noise channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 58(7):4678-4692.
- [72] KADLLOR S, ADVE R S, ECKFORD A W. Molecular communication using brownian motion with drift[J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2011,11(2):89-99.
- [73] ECKFORD A W. Nanoscale communication with brownianmotion[A]. Proc of CISS 07[C]. Baltimore, USA, 2007.160-165.
- [74] GREGORI M, LLASTER I. Physical channel characterization for medium-range nano-networks using flagellated bacteria[J]. *Journal of Computer Networks*, 2011, 55(3):102-107.
- [75] WALSH F, BALASUBRAM S. Review of communication mechanisms for biological nano and MEMS devices[A]. Proc of Bionetics'07[C]. Budapest, Hungary, 2007.307-312.
- [76] GARRALDA N, LLATSER J, CABELLOS A, *et al.* Diffusion based physical channel identification in molecular nanonetworks[J]. *Nano Communication Networks*, 2011, 2(4):196-204.
- [77] GREGORI M, LLATSER J. Physical channel characterization for medium-range nanonetworks using catalytic nanomotors[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 1(2):102-107.
- [78] NAKANO T, LIU J Q. Design and analysis of molecular relay channels: an information theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2010, 9(3):213-221.
- [79] KADLLOR S. A framework to study the molecular communication system[A]. Proc of ICCCN' 09[C]. San Francisco, USA, 2009.1-6.
- [80] FARSAD N, ECKFORD A W. A simple mathematical model for information rate of active transport molecular communication[A]. Proc of 1st MoNaCom[C]. Shanghai, China, 2011. 473-478.
- [81] FARSAD N, ECKFORD A W. Information rates of active propagation in microchannel molecular communication[A]. Proc of 5th ICST[C]. Boston, USA, 2010.16-21.
- [82] ECKFORD A W. Timing Information Rates for Active Transport-Molecular Communication[R]. *Nano Network Report*, 2009.
- [83] GALLUCCIO L, PALAZZO S. Modeling signal propagation in nano-machine-to-neuron communications[J]. *Nano Communication Networks*, 2011, 2(4):213-222.
- [84] KURAN M S, YILMAZ H B, TUGCU T, *et al.* Energy model for communication via diffusion in nanonetworks[J]. *Nano Communication Networks*, 2010, 1(2):86-95.
- [85] DOGU A. Capacity analysis of a diffusion-based short-range molecular nanocommunication channel[J]. *Computer Networks*, 2011, 55(6):1426-1434.
- [86] KARIG D K, SIUTI P, DAR R, *et al.* Model for biological communication in a nano-fabricated cell-mimic driven by stochastic resonance[J]. *Nano Communication Network*, 2011, 2(1):39-49.
- [87] ECKFORD A W. Achievable information rates for molecular communication with distinct molecules[A]. Proc of BIONETIC-S'07[C]. Budapest, Hungary, 2007. 313-315.
- [88] ATAKAN B, AKAN O B. On molecular multiple-access, broadcast, and relay channels in nanonetworks[A]. Proc of BIONET-ICS'08[C]. Brussels, Belgium, 2008. 67-74.
- [89] ATAKAN B, AKAN O B. Deterministic capacity of information flow in molecular nanonetworks[J]. *Nano Communication networks*, 2010, 1(1):31-42.
- [90] PIEROBON M, AKYILDIZ I F. Information capacity of diffusionbased molecular communication in nanonetworks[A]. Proc of 1st INFOCOM[C]. Shanghai, China, 2011. 506-510.
- [91] ECKFORD A W. Molecular communication: physically realistic models and achievable information rates[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(12):460-487.
- [92] MIORANDI D. A stochastic model for molecular communications[J]. *Nano Communication Networks*, 2011, 2(4):205-212.

- [93] ATAKAN B, AKAN O B. On channel capacity and error compensation in molecular communication[J]. Transactions on Computational System Biology X, 2008, 54(10):59-80.
- [94] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4):114-124.
MA Z C, SUN Y N, MEI T. Survey on wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2004, 25(4):114-124.
- [95] AKYILDIZ I F. Electromagnetic wireless nanosensor networks[J]. Nano Communication Networks, 2010, 1(1):3-19.
- [96] BUSH S F. Toward in vivo nanoscale communication networks: utilizing an active network architecture[J]. Frontiers of Computer Science in China, 2011, 5(3):316-326.
- [97] KOKSAL C E. Design and analysis of systems based on RF receivers with multiple carbon nanotube antennas[J]. Nano Communication Networks, 2010, 1(3):160-172.
- [98] HIYAMA S. Micropatterning of different kinds of biomaterials as a platform of a molecular communication system[A]. Proc of 1st IEEE MoNaCom[C]. Shanghai, China, 2011. 479-484.
- [99] MOORE M J, NAKANO T. Addressing by beacon distances using molecular communication[J]. Nano Communication Networks, 2011, 1(2):161-173.
- [100] NAKANO T. In-sequence molecule delivery over an aqueous medium[J]. Nano Communication Networks, 2010, 1(3):181-188.
- [101] PIETRO L, SATISHARAN B. Opportunistic routing through conjugation in bacteria communication nanonetwork[J]. Nano Communication Networks, 2011, 3(1):19-35.
- [102] CAKIR A R, OKTUG S. A nanonetwork environment with messaging and humoral immunity-based database implementation[J]. Nano Communication Networks, 2011, 4(2):189-198.
- [103] MORE M J, NAKANO T. Measuring distance from single spike feedback signals in molecular communication[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(7):3576-3587.
- [104] MORE M J, NAKANO T. Measuring distance with molecular communication feedback protocols[A]. Proc of 5th BIONETIC-S[C]. Boston, USA, 2010. 1-13.
- [105] GUL E, ATAKAN B, AKAN O. Nanons: a nanoscale network simulator framework for molecular communications[J]. Nano Communication Networks, 2010, 1(2):138-156.
- [106] LLATSER I, PASCUAL I, GARRALDA N, *et al.* N3Sim: A Simulation Framework for Diffusion-Based Molecular Communication[R]. IEEE Technical Committee on Simulation Report, 2011.

作者简介



黎作鹏(1979-), 男, 黑龙江伊春人, 哈尔滨工程大学博士生、国家公派留学美国爱荷华大学联合培养博士生, 主要研究方向为分子通信与纳米网络、无线传感器网络、信息物理融合系统(CPS)。



张菁(1965-), 女, 湖北武汉人, 博士, 哈尔滨工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网、虚拟现实。

蔡绍滨(1973-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络。

王勇(1983-), 男, 河南信阳人, 哈尔滨工程大学博士生、助教, 主要研究方向为数据挖掘技术。

倪军(1957-), 男, 上海人, 博士, 美国爱荷华大学教授、博士生导师, 主要研究方向为纳米网络及通信、数字医疗技术。