宏观尺度下的分子通信原型机综述

黄煜¹, 季飞², 温淼文^{2*}, 陈绚², 唐元锐², 郑倍雄³

1. 广州大学电子与通信工程学院, 广州 510006, 中国

2. 华南理工大学电子与信息学院, 广州 510641, 中国

3. Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117583, Singapore

* 通信作者. E-mail: eemwwen@scut.edu.cn

收稿日期: 2020-06-03; 修回日期: 2020-10-19; 接受日期: 2020-11-30; 网络出版日期: 2021-12-09

国家自然科学基金 (批准号: 61871190)、广东省自然资源厅广东省海洋经济发展 (海洋六大产业) 专项资金重点 (批准号: 粤自然资合 [2020]009 号) 和国家留学基金委 (批准号: 201906150032) 资助项目

摘要 分子通信是一种利用信息粒子的特性来传递信息的通信方式, 可用于常规信号载体 (如电磁波) 受限的场景. 目前的研究以理论分析为主, 而用于验证理论成果并推进实际应用的原型机实验仍然较少. 本文首先介绍了分子通信系统的定义, 描述了发射机、信道和接收机模型; 着重按信道类型回顾了现有的宏观尺度原型机研究及其对应理论成果; 最后, 根据理论模型与原型机实验结果的区别, 指出理论研究的局限、原型机实验的必要性, 以及未来研究方向.

关键词 扩散, 流体力学, 宏观尺度, 分子通信, 原型机

1 引言

用信息粒子 (如分子或离子) 的特性来实现信息传递的通信方式有着悠久的历史并广泛地存在于有机体内部或其之间. 在生物化学领域, 研究者们一般称之为化学通信 (chemical communication), 并从生命科学的角度去理解该机制. 直到 2005 年, 加州大学欧文分校 (University of California, Irvine) 的 Tatsuya Suda 团队和日本的移动通信运营商 NTT Docomo 首次从信息技术的角度去定义该机制的概念及基本模型, 并将其命名为分子通信 (molecular communication) [1]. 分子通信具备生物兼容性 (biocompatibility) 及低能耗的关键优势, 相比常规信号载体 (如电磁波), 它更适合应用于有机体内部及其之间的一些通信场景. 因此, 在一些特殊场景中, 分子通信甚至可以取代常规通信技术来完成信息传输任务. 由于它与信息科学、纳米科学、生物技术等学科密切相关, 分子通信也被认为是一门交叉学科 [2].

自然界中常见的分子通信例子如下: (1) 钙信号 (calcium signaling) 在细胞的生理活动中有着重要作用. 通过模拟无线电中的调幅和调频机制, 细胞之间可以利用钙离子 Ca^{2+} 的幅度和频率来传递信

引用格式: 黄煜, 季飞, 温淼文, 等. 宏观尺度下的分子通信原型机综述. 中国科学: 信息科学, 2021, 51: 2016–2036, doi: 10.1360/SSI-2020-0159
Huang Y, Ji F, Wen M W, et al. Survey on macro-scale molecular communication prototypes (in Chinese). Sci Sin Inform, 2021, 51: 2016–2036, doi: 10.1360/SSI-2020-0159

息^[3]; (2) 细菌可以传输并接收自身诱导物质从而在动态复杂的环境中实现群体感应 (quorum sensing), 这些诱导物质中包含了细菌种群密度等信息, 可以用于调控其生理特征^[4]; (3) 一些植物会释放特定的信息素 (pheromone), 附近的同类通过接收并解调信息素的浓度信号来协同种群的生长速度^[5]; (4) 雌性飞蛾释放性信息素以吸引附近的雄性同类从而达到繁衍的目的, 其传输距离甚至可能达到 11 km^[6]. 在以上这些例子中, 分子通信的传输距离各不相同. 根据传输距离, 可以将分子通信分为微观尺度 (micro-scale) 和宏观尺度 (macro-scale) 两种传输类型^[7], 其中, 微观尺度中的收发机一般是纳米机器人 (nanomachine) 和细胞等具有微小尺寸的物体, 其信道传输距离一般为纳米到微米的级别; 而宏观尺度的收发机一般为传统的电子器件及肉眼可见的有机体, 其信道的传输距离大致为厘米到米的级别.

当前分子通信的理论研究主要集中在微观尺度下, 该场景中的主要应用是靶向给药 (target drug delivery). 该技术是生物医疗领域的未来重要应用, 它可以调度一群纳米机器人到有机体内部的特定部位实现药物的释放, 在治疗患病处的同时降低对其他部位的影响. 因此, 相比传统的注射给药, 靶向给药技术不但可以有效地提供治疗, 而且可以降低药物所带来的副作用. 该技术需要纳米机器人采用合适的通信方式实现网络的组建, 在接收到特定指令信息后, 纳米机器人会导航到患病部位并释放特定药物. 假如采用基于电磁波的无线通信机制, 纳米机器人需要配备天线装置完成信息的收发. 由于纳米机器人本身的尺寸微小, 其天线尺寸也相应受限, 其电磁波信号一般位于太赫兹频段. 然而, 该频段中的无线通信技术仍然不够成熟; 此外, 电磁波在有机体的体液环境中衰减较快, 导致通信需要较高的能耗, 这对于微小的纳米机器人而言是极大的能源负担; 最重要的是, 该波段的电磁波是否会影晌生物组织的生理活动尚无定论. 由于传统通信技术存在局限性, 通信研究者们将目光投向自然界并获得启发, 找到了生物内部及之间广泛采用的分子通信机制. 通过合理的规划, 分子通信不但具备生物兼容性, 而且有高效节能性, 即在某些场景中可利用分子的布朗运动 (Brownian motion) 以无需额外能耗的自由扩散 (free diffusion) 机制来实现信息传输. 基于这些优势, 分子通信更适合应用于微观尺度下的通信场景中.

在宏观尺度下的分子通信也有许多重要的应用, 主要包括生物体特征识别、病毒检测、化学物质泄漏定位和黑匣子设计等^[8]. 基于以上的这些潜在应用, 分子通信在学术界得到广泛的关注及认可. 2015 年, 国际电气和电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 批准通过了 IEEE 1906.1 标准, 它是 IEEE 首个规定分子通信和纳米级通信框架的国际标准^[9].

分子通信及其相关应用可以给人类社会带来翻天覆地的变化, 然而, 其技术本身仍存在如下欠缺. 首先, 分子通信的研究历史相对较短, 研究者们对其认知有限. 从第 1 篇论文的发表至今, 分子通信仅有 15 年的研究时间^[10], 当前的理论研究主要以理想假设为主, 具体研究方向主要包括调制、信道建模、信号检测、信道编码、互信息量, 及信道容量的计算等. 这些研究更偏向于物理层, 而非基于实现的应用层. 相关研究者们认为它的发展水平仍然处于其婴儿期^[10,11]. 其次, 分子通信系统的实现具备挑战性. 基于扩散、对流等机制的信息粒子的运动存在着随机性, 这种随机性会导致之前传输的信号叠加在当前的接收信号中, 从而引起了码间串扰 (inter-symbol interference, ISI) 问题, 而实际系统中的湍流 (turbulent flow) 等外界干扰因素进一步加剧系统的不确定性, 它们极大地影响了接收机信号判决的准确性, 降低了分子通信系统的传输速度及可靠性. 最后, 由于硬件实现方面的局限性及大部分通信研究者对于生物知识的欠缺, 分子通信原型机实验成果匮乏, 难以论证其理论成果并修正理论模型.

为解决以上问题, 分子通信的研究者们设计了各类信道场景中的原型机来展示分子通信系统的实际运作. 这些原型机也可以验证其理论研究的有效性. 宏观尺度下的硬件设计具备简易性和实地展示

图 1 (网络版彩图) 基于自由扩散的分子通信端到端系统框图

Figure 1 (Color online) Diagram of free diffusion based end-to-end molecular communication system

的方便性, 因此当前的分子通信原型机的开发主要集中于该尺度. 此外, 这些原型机部分器件可以通过集成化降低尺寸大小, 为未来的微观尺度下的原型机发展铺路.

区别于以往对分子通信的基础理论性总结综述^[12~16], 本文的主要目的是回顾宏观尺度中的分子通信原型机的设计发展及其工程研究对理论研究的启示, 同时也点明了工程实验和理论研究之间的联系. 另外, 本文阐述了宏观尺度和微观尺度中的分子通信原型机的未来发展趋势. 在文章结构上, 本文首先介绍了分子通信的基本定义、尺度场景、潜在应用, 以及面临的问题, 接着系统性地回顾了分子通信的发射机、信道和接收机模块的理论模型. 然后, 本文根据不同的信道场景分类总结了宏观尺度中的分子通信原型机的发展历程. 最后, 根据上文的内容得出结论, 在指出理论模型与实际实验的差异的同时, 也探讨了分子通信的未来发展方向.

2 理论模型

和常见的通信系统一样, 无论是微观尺度或宏观尺度, 分子通信的端到端 (end-to-end) 系统均可由 3 个基本模块组成, 即发射机、信道和接收机^[16]. 目前分子通信的理论模型一般采用基于自由扩散的端到端系统模型, 其系统框图如图 1 所示.

其中, 发射机被建模为一个理想的点源, 接收机则为一个半径为 r 的球体, 从发射机到接收机中心的距离为 d . 在通信流程方面, 首先, 基于点源模型的发射机将待传输数据通过调制转换为适宜在信道中传输的化学信号, 即通过信息分子的特征展现. 在发射机上瞬间释放之后, 这些信息分子在无边界的信道中自发进行布朗运动, 其中部分可以抵达接收机内部. 最后, 接收机对其内部信号进行采样, 并利用适合的信号检测技术恢复传输数据. 以下将简单回顾分子通信的 3 个基本模块以及它们所组成的端到端系统的常见理论模型.

2.1 发射机

目前分子通信的发射机一般被假设为可以瞬时释放特定数目信息分子的理想点源, 它能够将信源

的数据调制为浓度(数量)^[17]、种类特征^[18]及其排列组合形式^[19,20]、浓度比例^[21]、空间位置^[22]、分子的释放时间^[23]等. 在理论研究中, 最常见的调制方式为浓度键控 (concentration shift keying, CSK), 它将信息比特映射为浓度阈值. 为了实现节能, 二进制 CSK 通常采用开关键控 (on-off keying, OOK), 即在发送数据比特“1”时释放一定数量的信息分子, 而发送比特“0”时则停止释放^[24]. 此外, 分子种类键控调制 (molecule shift keying, MoSK) 同样被广泛的采用, 它用不同的分子种类代表不同的传输符号. 如在二进制 MoSK 中, 发射“A”类型的分子可以代表比特“0”, “B”类型分子则代表比特“1”. 相比 CSK, MoSK 受到的 ISI 影响更少, 但需要在接收机上配备更多种类的分子传感器, 这同时也增大了硬件设计的负担.

2.2 信道

分子通信系统可以根据其距离长度采用不同的传输机制, 一些相关机制例举如下. 首先, 在短距分子通信系统中, 主要有基于自由扩散的被动传输机制和基于分子马达 (molecular motor) 并利用化学能驱动的主动传输机制^[25]; 而在中距分子通信系统中, 主要有基于反应扩散的被动传输机制, 即所谓间隙连接 (gap junction) 信道, 以及利用基于细菌马达 (bacterial motor) 的主动传输机制来传递大分子, 如脱氧核糖核酸 (deoxyriboNucleic Acid, DNA); 最后, 在长距分子通信系统中, 如上文提到的植物间的信息素交流场景中, 对流作用一般占主导地位. 此外, 分子的自由扩散及湍流也会对长距分子通信系统的传输造成一定的影响. 对于以上这些信道及传输机制的具体介绍, 读者可进一步参考文献 [13, 15, 26].

自由扩散机制是分子通信中的重要机制, 它利用了信息分子自身的布朗运动, 因此发射机在完成信息分子的释放后无需为信息传输消耗额外能量. 这些信息分子最终通过信道到达接收机^[27]. 从分子通信系统的能耗角度考虑, 利用自由扩散的传输机制是一种节能的方案, 它也因此被理论研究模型所青睐, 其系统及过程的示意图如图 1 所示. 自由扩散机制与流体力学的研究关系密切, 下文简单地叙述其原理及对应的数学表达. 首先, 质量守恒定律可由连续性方程 (continuity equation) 描述为

$$\frac{\partial c(\mathbf{d}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{d}, t) = 0. \quad (1)$$

该式表明一个稳态系统中的物质流入速度等于其流出速度, 其中 $c(\mathbf{d}, t)$ 和 $\mathbf{J}(\mathbf{d}, t)$ 分别表示 t 时刻位于三维直角坐标系空间矢量 $\mathbf{d}$ 的物质浓度和其通量矢量; $\nabla \cdot$ 表示散度运算. 菲克第一定律 (Fick's first law of diffusion) 描述了通量矢量与物质浓度梯度的关系, 表示如下:

$$\mathbf{J}(\mathbf{d}, t) = -D \nabla c(\mathbf{d}, t), \quad (2)$$

其中负号表示了物质扩散方向与浓度的空间梯度相反; D 是物质在对应信道环境中的扩散系数. 当传输粒子半径远大于流体粒子半径时, 其数学式可表示如下^[15]:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R_H}, \quad (3)$$

其中, k_B 是玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数, T 表示环境温度, η 和 R_H 分别是流体的动力粘度和水力半径. 扩散系数描述了扩散能力的强弱, 当它的数值越大, 则扩散能力越强, 反之则越弱; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$ 表示空间梯度. 根据式 (1) 和 (2), 菲克第二定律 (Fick's second law of diffusion) 描述了在扩散过程中某个空间位置的浓度随时间的变化:

$$\frac{\partial c(\mathbf{d}, t)}{\partial t} = D \Delta c(\mathbf{d}, t), \quad (4)$$

其中 $\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 代表拉普拉斯算子 (Laplace operator). 根据上文的发射机模型, 假设位于空间位置 $\mathbf{d}_0$ 的发射机在 $t = 0$ 的时刻于一个无边界空间中瞬间释放 N 个信息分子, 则系统有以下初始条件:

$$c(\mathbf{d}_0, t \rightarrow 0) = N\delta(\mathbf{d} - \mathbf{d}_0), \quad (5)$$

其中, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克 (Dirac) 函数. 为了方便表示, 可以假设发射机位于坐标原点, 即 $\mathbf{d}_0 = (0, 0, 0)$, 此时矢量 $\mathbf{d}$ 不但表示空间位置, 也是接收机与发射机的距离. 通常认为距离发射机无穷远处的分子浓度为 0, 则有以下边界条件:

$$c(\|\mathbf{d}\| \rightarrow \infty, t) = 0. \quad (6)$$

根据以上的初始条件和边界条件, 可得到偏微分方程式 (4) 的解如下 [26]:

$$c(\mathbf{d}, t) = \frac{N}{(4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{d}\|^2}{4Dt}\right), \quad (7)$$

这不仅是信号浓度, 也对应 t 时刻位于三维直角坐标系空间矢量 $\mathbf{d}$ 的冲激信道响应 (channel impulse response, CIR). 当发射机和接收机的距离远大于接收机半径时, 即 $\|\mathbf{d}\| \gg r$, 接收机内部的浓度几乎是均匀分布. 在该条件下, 接收机也可以近似为一个点源, 其 CIR 如式 (7) 表示 [24].

此外, 扩散过程通常可以和对流过程相结合. 此时, 式 (4) 可表示如下:

$$\frac{\partial c(\mathbf{d}, t)}{\partial t} = D\Delta c(\mathbf{d}, t) - \nabla \cdot (\mathbf{v}(\mathbf{d}, t)c(\mathbf{d}, t)), \quad (8)$$

其中 $\mathbf{v}(\mathbf{d}, t)$ 是流体的速度矢量. 根据同样的初始条件和边界条件, 在对流速度恒定并与时间和空间无关时, $\mathbf{v}(\mathbf{d}, t)$ 可简写为 $\mathbf{v}$, 得到的 CIR 表示如下:

$$c(\mathbf{d}, t) = \frac{N}{(4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{d} - t\mathbf{v}\|^2}{4Dt}\right). \quad (9)$$

以上理论模型考虑了非时变信道, 而信道中的一些参数可能随时间发生改变, 引起信道的时变性. 在通信过程中, 若收发机均保持固定, 则 $\mathbf{d}$ 保持不变. 考虑到发射机和接收机的移动性, 存在发射机移动的同时接收机保持固定、发射机保持固定的同时接收机移动, 以及发射机和接收机同时移动的 3 种情形. 当收发机距离随着时间发生变化时, $\mathbf{d}$ 可写作 $\mathbf{d}(t)$ [28, 29]. 此外, 信道中的温度可能随时间发生改变, 如式 (3) 所示, 此时扩散系数会随温度变化而发生改变 [30], 因此记为 $D(t)$.

2.3 接收机

目前分子通信系统的接收机主要分为主动和被动两种模型. 接收机可以计算其内部的信息分子数量, 在三维空间中一般被建模为球体. 主动接收机和被动接收机的根本区别在于主动接收机在计数的同时会将其内部的信息分子移除, 而被动接收机在对其体积范围内的分子数目 (浓度) 进行计数时并不影响信息分子的传输. 当发射信号如式 (5) 所示从坐标原点以脉冲形式释放且系统中没有对流作用时, 位于 $\mathbf{d} = (d, 0, 0)$ 的被动接收机在 t 时刻的浓度信号可由式 (7) 表示; 若引入对流作用, 则接收机的分子浓度信号则由式 (9) 表示. 因此, 在给定信息分子数量 N 和扩散系数 D 时, 式 (7) 的接收信号如图 2 所示, 其中传输距离分别为 10, 15 和 20 μm .

当引入对流作用时, 不同强度的对流作用带来的影响可由图 3 所示, 其中传输距离为 15 μm , 而对流速度分别为 0, 100 和 200 $\mu\text{m/s}$.

图 2 (网络版彩图) 自由扩散信道的浓度信号

Figure 2 (Color online) Concentration signal in the free diffusion based channel

图 3 (网络版彩图) 在不同强度的对流作用下的浓度信号

Figure 3 (Color online) Concentration signal with different drift intensity

不同于以上提到的被动接收机, 主动接收机会吸收到达其表面的信息分子. 因此, 在考虑主动接收机模型时, 系统中应增加如下边界条件 [26]:

$$c(\mathbf{d} \in S_{\text{rx}}, t) = 0, \quad (10)$$

其中, S_{rx} 为球形接收机的表面积. 由于主动接收机会吸收到达的信息分子, 多个相邻的接收机互相之间会造成影响, 难以获得接收信号的闭式解. 一般采用基于数据拟合的经验公式来解决该问题 [31].

接收机通过采样观测到对应的接收信号形式, 并根据发射机的调制类型选择特定的解调技术以恢复发射机的传输数据. 自由扩散信道中的被动接收机模型一般通过相干检测技术对接收信号的幅度和能量值进行处理, 然后实现符号判决以恢复传输信号. 该技术需要在获得信道状态信息 (channel state information, CSI) 以及系统实现同步的前提下才可以运行. 在信道状态信息受限的情况下, 可以采用非相干检测 [32~34]; 而当同步难以实现的时候, 分子通信系统可以采用基于异步的收发机框架实现信号检测 [35, 36].

2.4 端到端系统模型

以上的 3 个基本模块经过合理组合后, 可构成端到端系统模型 [37]. 综上, 最常见的简单系统是采用 CSK 的发射机根据信源的传输符号以脉冲的形式释放一定数量的信息分子进入无边界空间信道. 当发射信号不再是脉冲形式时, 可以通过发射信号和 CIR 的卷积运算得到对应的接收信号. 接收机通过特定的浓度传感器对到达的信号进行采样, 完成信号检测并获得发射机的传输数据.

3 原型机设计回顾

近几年分子通信的研究成果丰硕, 但主要体现在其理论进展上, 而工程实验方面的成就相对较少. 分子通信的理论研究主要基于理想信道条件, 忽略了实际信道中存在的复杂问题, 如湍流干扰等因素. 由于脱离了工程方面的指导, 理论模型中的技术可能无法直接应用于实际系统中. 为了拉近理论模型

图 4 分子原型机信道模型分类图
Figure 4 Category of channel models in molecular communication testbed

与实际系统的差距, 并推进分子通信的实际应用, 研究者们开发了不同信道场景中的原型机系统. 当前的原型机研究主要面向宏观尺度, 而对于微观尺度中的实验研究仍然有限. 以上现象的主要原因是分子通信的研究者们缺乏相关生物知识背景与实验条件, 而在宏观尺度下的原型机设计不但可以规避复杂的生物实验, 而且能够以较低的成本来展示分子通信系统的运行. 因此, 我们在本节主要对宏观尺度下的分子通信原型机的信道进行分类总结. 根据信道中流体的特征, 主要有气体和液体两类; 而根据其边界特征来进一步分类, 气体有自由空间, 管道空间, 而液体则有管道空间和容器空间, 其组合如图 4 展示.

因此, 目前的原型机主要有气体自由空间、气体管道空间、液体管道空间, 以及液体容器空间 4 种信道. 同时, 这些信道中也有各种传输机制, 如扩散、对流、荧光共振能量转移 (Forster resonance energy transfer, FRET) 等. 下文根据这 4 种类型的信道中的原型机, 分别回顾了它们的发展历程. 为了直观地展示原型机的进展以及其与理论研究的关系, 图 5 以时间轴的形式列出了分子通信研究的重要成果及其论文发表时间.

3.1 气体自由空间信道

第 1 款宏观尺度下的分子通信原型机采用了气体自由空间信道, 而当前大多数原型机也采用了这种信道模型. 因此, 本文首先回顾此类信道中的原型机进展. 2013 年, 加拿大约克大学 (York University) 和英国华威大学 (The University of Warwick) 的通信研究者们共同设计了这款原型机, 他们利用异丙醇酒精分子作为信息载体^[38]. 在该原型机中, 发射机和接收机均处于静止状态并水平放置于桌面上, 室内的空气则是传输信道. 在发射机上, 他们采用基于 ATmega328 芯片的 Arduino Uno 开源电子开发板, 并搭载液晶显示器. 用户可以直接通过按键输入待发送的文本信息, 这些文本则通过 ITA2 标准转换为二进制序列, 如字母 “S” 可由序列 “10100” 所表示. 同时, 调制方式则采用 OOK, 即传输比特 “1” 时, 发射机上的 DuroBlast 电子喷雾器喷射特定时间酒精溶液, 如持续 100 ms; 而在传输比特 “0” 时, 则不发生喷射. 除了发射机的喷射作用外, 该原型机分别通过 Honeywell 和 Dyson 两个品牌的风扇实现空气的流动, 以引入对流作用. 相对于理论中微观尺度下的纳米和微米级别的通信, 该信道中发射机和接收机的距离在米级别, 如 2 m. 接收机搭载着酒精浓度传感器, 如 MQ3, 可以检测酒精信号的浓度. 接收机根据每个符号时间内的信号差值情况来判决发射机传输的比特信号, 并恢复对应的文本信息. 在传输协议的设计上, 该系统分别用比特序列 “10” 和 “00000” 作为文本传输开始和结束的标志. 通过输出结果的观察发现该原型机系统存在原因未知的非线性因素, 而理论分子通信系统则假定具备线性特征. 此外, 该原型机的点对点的传输速率仍然较慢, 即使是在采用对流作用辅助的情况下, 仅达到 0.33 bps. 然而, 该原型机的重要意义在于展现了人造分子通信系统在宏观尺度上的可行性.

为了进一步探究原型机^[38]的信道和噪声模型及其中的非线性因素, 上述研究者们在他们 2014 年

图 5 分子通信研究重要时间节点
Figure 5 Milestone in molecular communication research

发表的论文中指出原型机和理论模型中的差距 [39]。首先,发射机上不能保证在传输相同比特或符号时喷射出同等剂量信息分子,信道中存在不稳定的湍流影响及其他干扰因素;接收机上则因信号响应时间和恢复时间的问题,导致式 (9) 中的理论 CIR 与实验结果不一致。为了解决这个问题,该论文根据非线性最小二乘准则获得实际信道响应的拟合函数。对于非线性系统的问题,研究者们利用实验数据将非线性分量建模为高斯 (Gauss) 噪声,则该非线性系统可转换为线性系统与高斯噪声分量的叠加,从而该原型机上可实现基于线性系统的理论技术,如多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术。

在原型机信道的研究方面,以陕西师范大学为主的研究者将该原型机 [38] 中的水平传输信道推广到垂直传输信道 [40],即发射机的喷口位于接收机的下方垂直处。相比工作 [38],文献 [40] 进一步考虑了重力对于分子数量的衰减作用。同年,延世大学 (Yonsei University) 和约克大学的研究团队在原型机 [38] 的基础上引入了 4G 移动通信中的核心技术——MIMO,开发了基于 MIMO 框架的分子通信原型机 [41]。它的基本硬件设备和传输协议均基于首款原型机 [38],区别则在于它采用了基于 MIMO 的系统框架,即发射机上有 2 个分隔一定距离的喷头 (相当于无线通信中的发射端天线),且接收机上也有对应发射机的 2 个检测传感器。借助拥有更多通道的优势,它的通信速率大约是第 1 款原型机的 1.7 倍,提升了数据传输效率。值得一提的是,分子通信中的应用 MIMO 理论最早于 2012 年被提出 [42],该论文探讨了分子通信中 MIMO 的两种工作模式,即空间分集和空间复用,它们分别可用于提升系统的可靠性和传输速率。这款 MIMO 原型机的重要意义在于证实了空间复用模式在分子通信系统中的提升传输速率的可行性。

以上的研究均考虑静止状态的分子通信原型机系统,而忽视了移动性这一重要因素。为了弥补对移动性研究的空缺,华威大学的研究者于 2016 年设计了一款移动信道中的分子通信原型机 [43]。该原型机仍以第 1 款分子通信原型机 [38] 为基础,通过将发射机装在可运动的小车上来实现发射机的移动作用。该小车通过接收无线电控制来完成相对接收机的向前或向后运动,引起收发机之间的距离的变化。然而,该原型机引入了移动概念,其主要目标是通过移动性来验证基于静止状态的检测方案不再适用于移动系统,并提出相应的信道编码方案可以提升通信系统可靠性。该工作并未实现移动环境中可靠并持续的分子通信。

不同于上述研究中所采用针对特定分子的浓度传感器作为接收机,为了进一步实现接收端检测的通用性,搭载质谱分析仪为接收机的原型机被提出。相较于传统浓度传感器,质谱仪所检测的分子种类

范围更广. 它先将接收的信息分子离子化, 生成相应的离子; 不同质荷比的离子在电场和磁场的作用下实现了分离; 最后根据不同质荷比的强度获得对应的质谱图, 以判断信息分子的种类构成及相应比例. 因此, 质谱分析仪不但能检测单独种类的分子, 也可以分析多种分子组成的混合物. 因此, 利物浦大学 (University of Liverpool) 的研究者于 2018 年将质谱分析仪装备在接收机上, 该接收机能够吸收信息分子, 即主动接收机. 发射机采用丙酮作为信息分子以作为信号流, 且在通信过程中一直喷射氮气提供对流作用, 即载体流. 收发机之间的信道是气体自由空间. 该研究表明信号流、载体流和符号时间 3 个因素对原型机接收信号的影响较大, 并在收发机距离为 2.5 cm 的情况下, 完成实验论证^[44]. 此外, 在距离设定为 2.5~15 cm 的情况下, 他们根据原型机实验探究了分子信号的衰减情况和噪声模型. 最后, 得出结论即该场景下的分子信号能量衰减强度可以超过电磁波信号, 且其噪声大致为高斯分布^[45].

华威大学的研究者于 2018 年引入了涡旋环 (vortex ring)^[46] 模式来发射信号, 其中涡旋产生器的直径为 0.2 m. 释放的涡旋环可以在涡旋产生器直径的 100 倍长度范围内能够保持形状, 即 20 m. 因此, 实地实验的收发机距离也达到了 20 m 的级别. 通过实际实验和基于 COMSOL 平台仿真的实验对比涡旋环模式的信号与喷射气体模式^[38], 发现在特定情况下, 涡旋环模式的传输信号的信号干扰比 (信号强度与 ISI 的比值) 是基于喷射气体模式的 211 倍, 即前者受到更少的 ISI 影响. 同时, 随着距离的增大, 喷射气体模式中的信号干扰比会下降, 而在涡旋环模式中会升高. 基于这个特性, 涡旋环模式可以在未来工作中推广到距离更远的宏观尺度分子通信系统中.

除了原型机设计, 电子科技大学的分子通信研究者在 2018 年重新验证了原型机^[38]的信息传输实验, 并针对其使用 OOK 调制的接收信号的特征提出了相应的差分检测算法^[47]. 其中, 分子信号在收到比特“1”时有上升的趋势, 而对于比特“0”则没有该特征, 因此可以利用接收信号的前后差值作为判决准则以区分比特“0”和比特“1”. 该算法首先在一个符号时间中进行多次采样, 当这些采样信号中的最大值小于某个阈值直接判决为比特“0”; 当大于等于该阈值时, 则执行差分策略, 即获得这些采样信号的前后差值并记录其为正数的次数, 若该次数大于某个设定阈值则判决为比特“1”, 否则为比特“0”. 在单输入单输出 (single-input single-output, SISO) 的分子通信系统的应用结果表明, 该算法可以极大地降低 ISI 的影响^[47].

在之前对原型机信道建模的基础上^[39], 研究者们进一步引入接收机上传感器, 探究它们对系统的影响, 并重新构建原型机^[38]的系统模型^[48]. 接收机采用了上文提到的 MQ-3 这款金属氧化物传感器来检测异丙醇酒精 (信息分子) 的浓度. 他们首先建立了 MQ-3 的电阻与信息分子浓度的模型, 其中理论浓度值通过扩散对流方程获得. 由于无法测得实际发射分子数及扩散系数等重要参数, 他们将电阻与浓度的关系式进一步修正, 该接收函数含有以下几个未知数: 分子喷射强度、有效扩散强度、平均对流速度, 以及传输距离. 通过多个场景下的测得的实验数据, 可以获得接收信号的通用表达式. 该论文根据接收信号特征和发射机无法实现脉冲喷射的特点, 进一步提出了一种适用于实际原型机中的调制方式, 即利用喷射不同长度的喷射时间来传输特定的符号.

3.2 气体管道空间信道

当气体中的传输有管状边界时, 则称为气体管道空间气体. 华威大学与其他院校的研究者开展了分子通信原型机与商用无线通信系统的对比实验^[49], 以验证分子通信可以在无线通信无法运作的场景下实现可靠通信的可能性. 作为参照组, 该无线通信系统采用 ZigBee 协议. 在这个过程中, 分子通信原型机的收发机模型仍然沿用首款原型机的硬件配置, 然而信道环境改为两个通过中空管道连接有边界金属空间, 即分子通信和无线通信的发射机安装在一个铁箱中, 它们对应的接收机则放置在另外

一个铁箱里,这两个铁箱通过半径为 2 cm,厚度为 2 mm 的中空铁管相连接.为了制造恶劣的电磁波传输环境,该铁管作为波导时,其工作频率约为 4~6 GHz,而 ZigBee 的载波频率 (2.4 GHz) 甚至低于其截止频率.因此,对于该无线通信系统的电磁波信号而言,该信道环境极为恶劣.在铁箱不封闭的前提下,该论文的对比实验结果表明,无线通信在不同形状的金属管情况下 (L 形、Z 形、U 形) 均会受到严重的路径损耗影响,而分子通信却能够完成有效的信息传输任务.

2017 年,利物浦大学的研究者们也将气体管状信道应用于上文提到的质谱仪接收机的原型机系统.他们首先验证了更换信道类型后的可行性,其中管道半径分别为 20 和 40 mm,长度为 1, 2 和 3 m.同时,该论文提出通过管道中传输气体可以实现保密通信的观点^[50].在此基础上,他们进一步验证了符号时间为 90 s 的 OOK 与 CSK 的可行性,并于特定距离实现了符号的成功传输^[51].目前的研究解决了气体自由空间信道中的一些建模问题^[39, 45, 48],然而对于气体管状空间信道研究仍然处于空白.2019 年,相同的研究者们利用圆柱坐标系中扩散对流方程及边界条件研究该圆柱管状信道的理论特征^[52].在该实验中,对流作用处于层流形式,其数据展现出与理论结果的一致性,同时该研究也发现气体管状空间信道中分子信号的噪声模型大致为高斯分布.

为了进一步提高气体信道中的原型机的通信速率并降低系统中的湍流影响,布朗大学 (Brown University) 的研究团队在 2018 年展示了他们的原型机^[53].该原型机的调制方式为 OOK,且信息分子均为异丙醇酒精.在传输比特“1”时,信息分子的喷射时间由 100 ms^[38] 降至 2 ms,这不仅让发射信号逼近理论中的脉冲喷射形式,同时可以降低符号时间以提高符号传输速率.此外,该原型机在发射机部分放置挡板以减少信道中的湍流影响.由于接收信号具备未知的随机性,该原型机先获得足够数量的比特“0”和比特“1”的样本接收信号,然后利用 Karhunen-Loeve 展开来提取它们分别所对应的特征,最后根据似然比来进行判决.该判决准则不仅适用于无 ISI 的低速传输系统中,也可以进一步推广到有 ISI 影响的高速传输系统中.该原型机以 10 bps 进行低速传输时的误码率小于 0.01,而以 40 bps 进行高速传输时的误码率约等于 0.01.在同样是气体信道的情况下,该原型机 (管道空间) 的有效传输速率是首款原型机 (自由空间) 的两个数量级^[38].

3.3 液体管道空间信道

除了气体之外,液体环境也是分子通信的重要信道.本文将边界为管状的液体信道定义为液体管道空间信道,它的主要意义在于模拟血管中的分子通信.2017 年,斯坦福大学 (Stanford University) 的研究团队开发了模拟生物体血管内的分子通信原型机^[54].当发射机传输比特“0”时,向硅胶管中喷射 30 ms 的酸性溶液,并保持一定的沉默时间;发送比特“1”时,则喷射 30 ms 的碱性溶液,再保持一定的沉默时间,而符号时间为喷射时间与沉默时间之和.信道是直径为 2.5 mm 的硅胶管.接收机通过 PH 检测计获得氢离子的浓度信号,并使用差分检测算法来恢复信号.该论文也引入了机器学习算法中的支持向量机与回归神经网络来检测信号,最后的误码率结果表明,机器学习算法的结果优于传统的差分检测算法,同时回归神经网络较支持向量机的性能更好.值得一提的是,该原型机的数据传输速率达到了 4 bps,与原型机^[38] 相比甚至提高了一个数量级.2020 年,延世大学的研究者又在该原型机的基础上搭建了 2×2 MIMO 框架^[55].同样地,2×2 MIMO 框架下的原型机传输速率虽然较工作^[54] 得到了一定的提升,却无法达到其 2 倍,根本原因在于其引入了链路间干扰.

上述某些原型机中的信息分子,如酒精、酸碱试剂等,可能会干扰有机体的生理活动.基于这个问题,磁性纳米粒子因其不干扰生理活动且具备生物兼容性的优势引起了分子通信研究者的关注,埃尔朗根-纽伦堡大学 (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg) 的研究者在 2017 年将其理论设想发表于文献^[56],并在 2018 年实现了将流体力学半径为 27.5 nm 的磁性纳米粒子作为信息分

子应用到血管状的分子通信原型机中^[57]。在硬件方面, 该原型机系统应用了两个泵, 其中第 1 个泵用于喷射含有磁性纳米粒子的溶液, 第 2 个泵则以层流的形式提供速度为每分钟 5 ml 的水溶液辅助信息分子传输。值得一提的是, 该原型机的传输距离仅为 5 cm。由于信道的佩克莱特数 (Peclet number) 较大, 因此该原型机的传输过程主要考虑对流作用并可忽略扩散的影响。调制方面, 该原型机仍然采用 OOK, 在传输比特“1”时的喷射时间为 160 ms, 其比特时间一共为 4 s。接收机采用磁化率仪检测输入信号, 其信号的强度和磁性纳米粒子的数量成正比。最后, 接收机通过预先设定的阈值进行符号判决以恢复传输信息。为了进一步探究磁性纳米粒子的位置及分布状况对接收信号的影响, 他们在 2019 年通过实际实验和计算机仿真得出了相应的结论, 即当磁性纳米粒子相对于磁化率计上的线圈做轴向运动时, 接收信号会先增大再达到一个饱和阶段; 当磁性纳米粒子相对于磁化率计上的线圈做径向运动时, 接收信号则会以指数趋势增大^[58]。相比之前以米为级别的通信距离的原型机, 它的重要意义在于实现了厘米级信道中的信息传输, 分子通信原型机系统也由此向微观尺度迈进一步。

华威大学的研究者们于 2019 年公布了一款更大体积的液体信道分子通信原型机, 并以稳流或湍流为主导动力^[59]。该原型机的通信距离为 2.7 m, 其信道为一个 15 m×300 mm×380 mm 的长方体水槽。它用注射器, 即发射机, 注入荧光跟踪液体 (Rhodamine 6G) 作为信息分子, 在湍流格栅的作用下可将水槽内液体的流速从 0.086 m/s 提升至 0.26 m/s, 并以激光薄片作为接收机, 从而实现接收机检测浓度的可视化。在此基础上, 通过多次实验分析了该信道的噪声的分布以及最大化互信息量的发送策略。

除了原型机的实地实验, 基于仿真平台的实验也是检验理论成果的关键因素。基于以上观点, 谢里夫理工大学 (Sharif University of Technology) 的研究者们于 2019 年设计了一款基于液体管道空间信道的原型机^[60]。发射机方面, 它采用 OOK 调制技术, 并以盐酸溶液中的氢离子作为信息载体; 信道方面, 则以长度为 2 m, 横截面半径为 10 cm 的机玻璃管为整体传输管道, 其中水作为载体流为信息分子传输提供 2.24 cm/s 的稳定流速, 而收发端的通信距离则为 0.65 m; 接收机上采用 PH 检测计为浓度传感器。为了提升传输速率, 该实验平台搭载了基于自适应判决阈值的 ISI 消除算法来降低之前的传输符号对当前符号的判决影响, 并根据理论模型设计最优接收机。同工作 [39], 接收机上的 PH 检测计需要一定的反应时间以实现准确的检测值。因此, 在理论模型的推导中, 研究者们将该延时反应过程建模为脉冲响应, 以实现线性时不变系统。该原型机的主要意义在于, 其理论模型正确性由原型机的实地实验和基于 COMSOL 平台的仿真实验共同验证。

3.4 液体容器空间信道

当信道为液体环境且非管状边界时, 我们将该场景定义为液体容器空间信道。值得一提的是, 该信道空间体积可大可小, 其中大体积的液体容器空间信道可以模拟海洋或湖泊等环境中水生生物之间的信息素交流; 而小体积的液体容器空间信道则可以是实验容器, 它甚至能够实现在宏观尺度中观测微观世界中的细胞级尺度通信。

分子通信原型机的传输速度在引入 FRET 后得到了显著提升, 这是一种荧光分子之间以非辐射的形式完成能量转移的机制。2015 年, 土耳其科奇大学 (Koc University) 的研究团队实现了基于 FRET 机制的分子通信原型机^[61], 验证其应用于分子通信系统的可行性。在这个原型机系统中, 乙醇溶液 (信道) 放置于一个实验容器中。高浓度荧光素 (fluorescein) 和罗丹明 B (Rhodamine B) 染料分别溶于乙醇溶液, 并分别作为供体 (donor) 和受体 (acceptor)。同时, 一个特定频段的激光源作为信源通过 OOK 调制向供体传输信号, 接着供体通过 FRET 机制向受体传输信息, 最终将该信息传送至光检测器中得到解调信号。相对于该工程实验, FRET 机制可用于分子通信系统的理论在 2012 年首次被提出^[62], 该

图 6 水池信道原型机初步展示

Figure 6 Preliminary demonstration of the prototype in pool channel

理论工作建立了单个供体和单个受体的端对端通信模型. 然而, 在 FRET 分子通信原型机的实验中, 信道里分布着许多供体和受体, 它们通过随机配对来传递相同的信息来提升传输的可靠性, 作者将这一过程比作协作 MIMO. 同时, 该原型机也借鉴眼图来分析信号的质量. 由于供体的激发时间和受体的发射时间具有随机性引起了时间抖动 (jitter), 因此传输速度从 50 kbps 增大到 250 kbps 的过程中, 可以发现眼图上的“眼睛”有逐渐闭合的趋势, 即系统的误码率随着传输速率的上升而显著下降. 在传输速率和误比特率方面, 达到 50 和 150 kbps 的传输速率时, 该原型机的误比特率分别为 10^{-6} 和 10^{-5} 级别, 而在 250 kbps 时则高达 0.03. 该成果意义不仅是因为它验证了 FRET 用于分子通信系统的可行性, 最重要是相比其他基于扩散和对流等机制的传统分子通信, 这种传输机制可以实现分子通信系统高速且可靠的信息交互.

为了推进分子通信在生物领域的应用, 埃尔朗根 – 纽伦堡大学的研究团队于 2019 年将细胞引入分子通信原型机中. 该原型机采用了 OOK 调制, 即发光二极管的开关关闭刺激细胞传递信息. 这是因为位于实验容器中的基于基因改造的视网膜细胞在感应到超过特定阈值的发光强度时会释放出一定量的氢离子. 细胞外部环境的 PH 值会因此降低, 而这种变化趋势会被接收端的 PH 检测计所感知并解调 [63]. 同年 10 月, 他们对该原型机进行了详细的总结及未来展望, 并呼吁分子通信的研究应该更多地考虑生物因素 [64].

除了理论分析工作 [8] 外, 目前仍然没有在液体自由空间信道的分子通信实验. 为了进一步探究分子通信在液体信道中的特性, 华南理工大学的研究者 (本文作者) 于 2019 年初步设计了位于液体容器空间信道的原型机, 其实验环境分别为大容量水池和相比工作 [58] 更小的水槽. 大容量水池可以类比成自由空间, 其蓄水量远大于水槽信道. 在大水池信道中, 原型机为 SISO 框架, 其发射机采用 OOK 调制. 传输比特 “1” 时, 发射机借助水泵喷射盐酸溶液, 而传输比特 “0” 时则在符号时间内保持沉默. 除了传输比特 “1” 的喷射外, 该系统无外界提供的持续对流作用. 接收机上装备 PH 检测计, 并以 5 Hz 的采样率获得浓度信号, 最后通过差分检测算法来恢复传输比特. 在大水池信道进行实验的分子通信原型机系统如图 6 所示.

基于以上的 SISO 框架, 该原型机也在水槽信道中搭建了 MIMO 框架. MIMO 系统中的发射机借鉴无线通信空间键控 (space shift keying, SSK) 调制技术, 利用空间域来传输信号. SSK 的机制为在每个符号时间中选定特定位置的发射机来喷射盐酸溶液. 在没有干扰的情况下, 距离该发射机位置最

图 7 (网络版彩图) 目标信号和链路间干扰

Figure 7 (Color online) Desired signal and inter-link interference

图 8 (网络版彩图) 差分算法与最优固定阈值的信号的误符号率性能对比

Figure 8 (Color online) Symbol error rate comparison between differential detection and optimal fixed threshold schemes

近接收机会检测到最大的浓度信号. 因此可以利用非相干检测进行判决. 一个基于 2×2 MIMO 原型机在水槽信道中的目标信号以及链路间干扰 (来自非配对发射机的浓度信号) 分别如图 7 所示^[65]. 和原型机^[53] 信号的单位一样, 该工作的采集数据也用任意单位来表示. 由图 7 可以看到, MIMO 分子通信系统的实际信号以及链路间干扰和图 2 与 3 中的理论信号的趋势一样均为先上升后下降, 而它们的不同之处则在于前者是基于实际实验的结果. 由于原型机实验中无法完美实现脉冲发送, 图 7 的接收信号并非理想的冲激响应, 并且受到噪声的干扰, 而图 2 与 3 则展现理想脉冲所对应的冲激响应. 根据观测, 无论是实际实验或是理论研究, 接收信号均具有拖尾性. 因此, 在符号时间有限的情况下, 系统里都会存在 ISI 并影响后面接收符号的判决结果. 因此, 采用基于固定阈值的检测方法容易发生误判, 而基于记忆的自适应阈值检测则需要更高的复杂度, 并有错误传播的风险.

根据以上原型机中的浓度信号特征, 即在特定的符号时间设定下, 浓度信号在上升阶段的变换程度远大于其下降阶段的变化程度, 研究者在工作^[47] 的基础上提出一种可用于 SISO 和 MIMO 分子通信系统的差分检测算法^[66], 该差分算法利用接收信号的前后差值大小来判断发送符号. 在接收信号同时受到 ISI 和链路间干扰的影响下, 它仍然可在特定条件下实现序列长度为 10000 比特的无误检测. 为了对比差分检测获得的性能增益, 图 8 利用基于最优固定阈值和差分检测的方法展示了一个采用 4×4 MIMO 框架的 SSK 分子通信系统的误符号率性能. 其中, 仿真的接收信号根据实际实验中的采集数据生成, 并考虑了不同 ISI 长度的影响, 分别为 3 和 5.

为了清晰地阐述这些原型机系统的特点及彼此之间的差异, 表 1 对不同信道模型中较有代表性的原型机进行了总结, 同时展示了它们所对应的分子种类、通信距离、原型机特点, 及发表年份.

4 理论与实验对比

原型机实验中获得的数据可以直观地反映出与分子通信理论模型的差距, 并分别体现在发射机、信道和接收机 3 个模块中.

表 1 不同信道模型中的原型机对比

Table 1 Comparison of prototypes in different channel models

Reference	Channel model	Information molecule	Distance (m)	Testbed features
[38]	Gaseous free space	Isopropyl alcohol	[2–4]	First macro-scale molecular communication prototype
[39]	Gaseous free space	Isopropyl alcohol	0.9	Introduction of MIMO technique
[40]	Gaseous free space	Isopropyl alcohol	0.1	From horizontal channel to vertical channel
[43]	Gaseous free space	Isopropyl alcohol	[0.5–3]	Mobile transmitter
[44]	Gaseous free space	Acetone	[0.025]	Receiver deploys the mass spectrophotometry technique
[47]	Gaseous free space	Isopropyl alcohol	[0.6–1.4]	Differential detection for ISI mitigation
[49]	Gaseous tubular space	Isopropyl alcohol	[1.27–3.9]	Validating the feasibility of molecular communication as an alternative for conventional communications
[52]	Gaseous tubular space	Acetone	[0.5–3]	Noise model estimation in the tubular space channel
[53]	Gaseous tubular space	Isopropyl alcohol	1.4	Enhancement of the communication efficiency by upgrading hardware
[54]	Liquid tubular space	Acid/Base	[0.1, 0.5]	Imitation of the vessel environment
[57]	Liquid tubular space	Magnetic nanoparticle	0.05	Realization of the cm-scale molecular communication
[65]	Liquid container space	Hydrogen ion	[0.1–0.4]	First underwater testbed with error-free differential detection

4.1 发射信号

在目前的理论研究中, 发射机模型一般假设为点源, 其中特定数量的信息分子以脉冲形式瞬间释放. 然而, 在实际电路系统中并不存在这种瞬时释放的机制, 即式 (5) 中的狄拉克函数, 这是因为发射机电路需要一定的时间来开启和关闭释放信息分子的设备, 因此发射信号可能会持续一定的时间, 如方波^[60]、三角波等形式. 同时, 受传统通信技术的启发, 合适的脉冲成型技术有助于 ISI 的降低和消除. 假设接收信号为没有 ISI 影响的情况, 可以利用拉普拉斯变换/反变换及数学近似来反向求得较好的脉冲成型方案^[67]. 在数量精度上, 信息分子或离子数目是离散存在的. 在以浓度为目标的场景下, 它们的释放数目可能比较庞大, 发射机无法实现在个数级别上的精密控制. 因此, 同一传输符号的每一次分子释放数目可能服从某种分布. 最后, 由于发射机本身的物理构造, 其外形不可能是一个理想点源. 综上, 式 (5) 的初始条件或许不适用于实际的分子通信系统.

4.2 信道模型与边界条件

许多分子通信理论研究中的信道模型不考虑边界问题, 并假设信道是无边界空间; 而部分理论研究则考虑理想的边界问题, 如特定形状的管道和接收机. 分子通信领域提出的许多理论技术, 如调制解调等均基于线性系统的假设, 而实际信道中则存在系统本身和外界因素带来的非线性因素影响, 如湍流等扰动因素. 此外, 实际的传输环境的边界条件甚至可能随着时间而改变, 即时变信道. 因此, 分子通信的理论成果可能无法直接应用于其工程实验中, 导致理论与实验研究脱钩. 相比之下, 无线通信

技术的移动通信领域则根据外界环境, 如地貌等特点, 建立了成熟的经验模型, 如 Okumura-Hata 模型等^[68]. 因此, 急需根据分子通信的应用场景, 无论是微观尺度还是宏观尺度, 通过原型机实验获得数据和经验逐步建立合适的信道模型以推进分子通信的发展^[69].

实际分子通信系统的边界问题十分复杂, 难以实现用闭式解表达完成信道建模. 在这种情况下, 有研究者提出分子通信可以采用机器学习的方法对已获得的接收信号从数据驱动的角度来完成信道建模^[70, 71]. 目前已有部分工作应用神经网络来辅助分子通信的信道建模^[72, 73].

4.3 接收机检测

理论模型中的接收机通常可以完美地计算出其体积范围内的信息分子数量/浓度. 然而, 接收信号经过模数转换时会经历量化误差等干扰, 导致其检测浓度值与实际情况的偏差. 同时, 接收机可能存在计数噪声, 即其所检测浓度值与实际浓度不一致. 另外, 原型机的接收机传感器可能有阈值限制, 即无法检测超过特定浓度的信息分子. 最后, 实际系统的硬件设备可能会存在反应时间问题, 导致接收机无法实时处理信号.

4.4 实验的优势及不足

通过实地实验, 分子通信的研究者可以摆脱单纯的理论研究束缚, 并对实际场景中的分子通信系统有了更深入的了解. 通过工程发现的问题, 研究者们可以更好地改进理论研究中的系统模型设置. 例如, 在发射机上需要进一步考虑脉冲成型的策略而不是像之前直接使用理想脉冲的理论研究; 而在信道中, 则要摆脱拥有理想 CIR 的假设, 同时设计对应的信道估计方案; 最后, 在接收机上要更多地考虑有效且具备低复杂度的检测方案.

除了以上的优势外, 工程实验目前的不足之处在于其实验场景主要考虑了宏观尺度, 同时这些原型机的系统框架仍然局限于传统的电子器件组合, 忽视了生物兼容性问题. 当前微观尺度中的分子通信原型机的研究仍然较少, 而这种适用于生物体内的通信机制需要更多地考虑微观尺度系统的特性及其物理材料的生物兼容性.

5 未来发展

作为一种新型的通信技术, 分子通信不但可以解决传统通信场景中遇到的传输问题, 也可以用于探究生物领域的问题. 从通信工程的研究角度, 它可以扩大当前通信技术的覆盖范围, 有望在纳米及微米尺度的信道中实现信息的有效传输及交互. 从生物工程及纳米医学领域的研究角度, 分子通信可以用于生物体内靶向给药的实现过程研究, 它甚至可以用于建立病毒在流体中的传播模型.

5.1 解决通信工程的问题

分子通信以其独特的传输特性能够解决传统的通信技术在特定信道环境中无法完成信息交互的问题. 虽然分子通信和传统通信技术在信号载体、信道环境, 以及系统设计的复杂度方面有所区别, 它们之间仍然存在相似性, 例如它们的基本通信模型都可以简化为发射机、信道, 以及接收机 3 个基本模块. 因此, 分子通信在某些方面可以借鉴无线通信等其他传统通信方式中的技术, 例如, MIMO 技术可以提高分子通信的传输速率或误符号率性能, 而分子眼图可以通过信号质量来对比各种调制方案的优劣^[74], 这些技术也在分子通信原型机系统^[54, 63]中得到了应用. 此外, 均衡、多址接入、信道容量分析等现有传统通信理论都指导了分子通信技术的发展. 不断更新换代的传统通信技术也为分子通信技术提供了新技术的来源. 同时, 由于分子通信和生物技术的相关性, 一些仿生的理念也可应用于分子

通信系统中. 除了具备与传统通信技术的相似性及与生物技术的相关性, 分子通信技术的独特性也值得关注, 学者可以根据分子通信自身特性来提出相应的新方案.

5.2 解决生物工程及纳米医学的问题

除了能解决传统的通信问题, 分子通信也可以解决生物工程及纳米医学领域的问题. 微观尺度中的分子通信技术能够让物联网的服务范围推广至微米乃至纳米级别的传输距离. 因此, 分子通信可以实现如靶向给药、基于细胞级别的健康监测、改变材料特性等^[75]. 在信息分子的选择上, DNA 分子因其可以进出微观尺度发射机上的纳米通道, 具备良好的生物兼容性、化学稳定性, 以及高速传输的潜力等优势, 引起了分子通信研究者们的关注. 基于以上原因, 剑桥大学 (University of Cambridge) 的研究者在 2018 年的研究论文中提出将 DNA 分子用于微观尺度的分子通信系统中来传输信息, 并提出了在接收机上使用核酸键控 (nucleotide shift keying, NSK) 调制技术^[76]. 有别于利用分子浓度和种类的调制方式, NSK 则将信息承载于 DNA 分子中大量的碱基序列上. 因此, 利用 DNA 信息存储及读取技术, NSK 能够解决传统分子通信的低速率调制问题, 其传输速度有望达到几百 Mbps^[77]. 此外, 他们在 2019 年构想了分子信息保真 (molecular information-fidelity, Mi-Fi) 技术, 而 Mi-Fi 甚至可以用不同种类的 DNA 链实现高速分子通信中多用户传输场景.

将宏观尺度中原型机微型化是实现分子通信在生物体内应用的必经之路. 即使这一过程目前仍受到封装和能量收集等技术的约束, 微观尺度下的分子通信原型机研究设计也开始崭露头角. 相关的工程实验方面, 同济大学的研究者在 2020 年实现了宏观尺度输入系统与微观尺度分子通信原型机的连接通道. 该通道可以将电信号转换为微观尺度中的 DNA 分子浓度信号, 完成了微观尺度中分子通信原型机的初步探索. 在该微观尺度的分子通信原型机中, 发射机采用 OOK 的调制方式来控制 DNA 分子的释放. 在信道中, DNA 分子的移动不但由本身的布朗运动导致, 还受到了外界电场所施加的影响. 最后, 接收机根据信号的特点采用了差分检测技术并实现了速率为 1 bpm 的信息传输^[78]. 同年, 韩国延世大学的研究者在理论层面构想了在人体血管内利用葡萄糖作为信息分子的纳米级分子通信系统^[79]. 在他们实际的实验中, 发射机采用 OOK 调制来控制水泵对葡萄糖分子的喷射, 并采用橡胶管替代人体的血管信道, 接收机则采用 PH 计检测葡萄糖化学反应后的氢离子^[79]. 相比于以上介绍的宏观尺度下的分子通信原型机, 这些微观尺度的原型机系统更多地考虑了信息分子的生物兼容性以及通信系统的适用性问题.

宏观尺度中的分子通信也可用于研究病毒在空气中的传播机制. 分子通信的研究者们提出了以下观点, 即生物体在呼吸过程中所释放的气体成分组成包含了关于其健康状态的信息^[80]. 因此, 在一定距离处可放置特定的检测器对该生物体进行健康状态的评估. 某些种类的病毒会通过气溶胶 (aerosol) 形式在空气中传播. 在此场景中, 可将气溶胶视为信息分子, 则病毒气溶胶传播的机制可以由宏观尺度下的分子通信系统所描述, 即以携带病毒的生物体为发射机, 信道为对应的传播或检测场景 (如空气), 而接收机则可以是易感者或病毒检测器. 根据文献 [80] 所提出的设想, 研究者在借鉴宏观尺度下的分子通信信道模型的基础上, 同时考虑到气溶胶传播环境的初始条件及边界条件提出了对应的信道数学模型^[81]. 因此, 宏观尺度中的分子通信甚至可以从信息传输的角度来研究病毒的传播. 综上, 分子通信因具备解决传统通信问题及生物工程与纳米医学难题的潜能, 被认为是未来 6G 网络中的一种关键性技术^[82].

6 结束语

和大多数科学研究一样, 在分子通信发展过程中, 它的理论研究一般领先于相应的原型机实验. 作为一种新型的通信技术和交叉学科, 分子通信于近几年得到广泛的关注与认同. 然而, 目前对于分子通信的研究主要在理论层面, 其工程实验则相对较少. 自 2013 年的第 1 款宏观尺度分子通信原型机问世以来, 分子通信的原型机在通信速率和检测算法上实现了较大的改进. 微观尺度的分子通信原型机于 2020 年初面世, 它和宏观尺度中的原型机一起提高了研究者们对于分子通信领域的工程认知度. 同时, 这些工程研究能够验证理论技术的可行性并指导理论研究者建立和考虑更符合实际的系统模型. 综合以上的研究总结, 分子通信的研究阶段正在从其婴儿期逐步进入理论与工程携手并进的成长期.

参考文献

- 1 Hiyama S, Moritani Y, Suda T, et al. Molecular communication. In: Proceedings of NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, 2005. 392–395
- 2 Nakano T. Molecular communication: a 10 year retrospective. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2017, 3: 71–78
- 3 Berridge M J. The AM and FM of calcium signalling. *Nature*, 1997, 386: 759–760
- 4 Abadal S, Akyildiz I F. Automata modeling of quorum sensing for nanocommunication networks. *Nano Commun Netw*, 2011, 2: 74–83
- 5 Unluturk B D, Akyildiz I F. An end-to-end model of plant pheromone channel for long range molecular communication. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2017, 16: 11–20
- 6 Symonds M R E, Johnson T L, Elgar M A. Pheromone production, male abundance, body size, and the evolution of elaborate antennae in moths. *Ecol Evol*, 2012, 2: 227–246
- 7 Nakano T, Suda T, Okaie Y, et al. Molecular communication among biological nanomachines: a layered architecture and research issues. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2014, 13: 169–197
- 8 Qiu S, Guo W S, Li B, et al. Long range and long duration underwater localization using molecular messaging. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2015, 1: 363–370
- 9 Bush S F. Interoperable nanoscale communication [future directions]. *IEEE Consumer Electron Mag*, 2017, 6: 39–47
- 10 Suda T, Nakano T. Molecular communication: a personal perspective. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2018, 17: 424–432
- 11 Akyildiz I, Fekri F, Sivakumar R, et al. Monaco: fundamentals of molecular nano-communication networks. *IEEE Wirel Commun*, 2012, 19: 12–18
- 12 Nakano T, Moore M J, Wei F, et al. Molecular communication and networking: opportunities and challenges. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2012, 11: 135–148
- 13 Li Z P, Zhang J, Cai S B, et al. Review on molecular communication. *J Commun*, 2013, 34: 152–167 [黎作鹏, 张菁, 蔡绍滨, 等. 分子通信研究综述. *通信学报*, 2013, 34: 152–167]
- 14 Peng M G, Ai Y, Ji X D. Diffusion-based molecular communication and body-area nano-networks. *J China Univ Post Telecommun*, 2016, 39: 1–9 [彭木根, 艾元, 纪晓东. 基于扩散的分子通信与身体域纳米网络. *北京邮电大学学报*, 2016, 39: 1–9]
- 15 Farsad N, Yilmaz H, Eckford A, et al. A comprehensive survey of recent advancements in molecular communication. *IEEE Commun Surv Tut*, 2016, 18: 1887–1919
- 16 Gohari A, Mirmohseni M, Nasiri-Kenari M. Information theory of molecular communication: directions and challenges. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2016, 2: 120–142
- 17 Kuran M, Yilmaz H, Tugcu T, et al. Modulation techniques for communication via diffusion in nanonetworks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), 2011. 1–5
- 18 Kabir M H, Islam R, Kwak K S, et al. D-MoSK modulation in molecular communications. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2015, 14: 680–683
- 19 Tang Y K, Wen M W, Chen X, et al. Molecular type permutation shift keying for molecular communication. *IEEE*

- Trans Mol Biol Multi-Scale Commun, 2020, 6: 160–164
- 20 Chen X, Huang Y, Yang L L, et al. Generalized molecular-shift keying (GMoSK): principles and performance analysis. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2020, 6: 168–183
 - 21 Kim N R, Chae C B. Novel modulation techniques using isomers as messenger molecules for nano communication networks via diffusion. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2013, 31: 847–856
 - 22 Huang Y, Wen M W, Yang L L, et al. Spatial modulation for molecular communication. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2019, 13: 381–395
 - 23 Srinivas K V, Eckford A W, Adve R S. Molecular communication in fluid media: the additive inverse gaussian noise channel. *IEEE Trans Inform Theory*, 2012, 58: 4678–4692
 - 24 Shi L, Yang L L. Error performance analysis of diffusive molecular communication systems with on-off keying modulation. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2017, 3: 224–238
 - 25 Darchini K, Alfa A S. Molecular communication via microtubules and physical contact in nanonetworks: a survey. *Nano Commun Netw*, 2013, 4: 73–85
 - 26 Jamali V, Ahmadzadeh A, Wicke W, et al. Channel modeling for diffusive molecular communication — a tutorial review. *Proc IEEE*, 2019, 107: 1256–1301
 - 27 Llatser I, Cabellos-Aparicio A, Pierobon M, et al. Detection techniques for diffusion-based molecular communication. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2013, 31: 726–734
 - 28 Chang G, Lin L, Yan H. Adaptive detection and ISI mitigation for mobile molecular communication. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2018, 17: 21–35
 - 29 Huang S, Lin L, Yan H, et al. Statistical analysis of received signal and error performance for mobile molecular communication. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2019, 18: 415–427
 - 30 Qiu S, Asyhari T, Guo W S, et al. Molecular channel fading due to diffusivity fluctuations. *IEEE Commun Lett*, 2017, 21: 676–679
 - 31 Bao X, Zhu Y F, Zhang W C. Channel characteristics for molecular communication via diffusion with a spherical boundary. *IEEE Wirel Commun Lett*, 2019, 8: 957–960
 - 32 Li B, Sun M W, Wang S Y, et al. Low-complexity noncoherent signal detection for nanoscale molecular communications. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2016, 15: 3–10
 - 33 Jamali V, Farsad N, Schober R, et al. Non-coherent detection for diffusive molecular communication systems. *IEEE Trans Commun*, 2018, 66: 2515–2531
 - 34 Wei Z K, Guo W S, Li B, et al. High-dimensional metric combining for non-coherent molecular signal detection. *IEEE Trans Commun*, 2020, 68: 1479–1493
 - 35 Li Q C. The clock-free asynchronous receiver design for molecular timing channels in diffusion-based molecular communications. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2019, 18: 585–596
 - 36 Li Q C. A novel time-based modulation scheme in time-asynchronous channels for molecular communications. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2020, 19: 59–67
 - 37 Pierobon M, Akyildiz I. A physical end-to-end model for molecular communication in nanonetworks. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2010, 28: 602–611
 - 38 Farsad N, Guo W, Eckford A. Tabletop molecular communication: text messages through chemical signals. *PLOS ONE*, 2013, 8: 1–13
 - 39 Farsad N, Kim N R, Eckford A W, et al. Channel and noise models for nonlinear molecular communication systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2014, 32: 2392–2401
 - 40 Lu P F, You Y, Liu B, et al. A vertical channel model of molecular communication based on alcohol molecules. In: *Proceedings of EAI International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies*, 2016. 157–162
 - 41 Koo B H, Lee C, Yilmaz H B, et al. Molecular MIMO: from theory to prototype. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2016, 34: 600–614
 - 42 Meng L S, Yeh P, Chen K C, et al. MIMO communications based on molecular diffusion. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2012. 5380–5385
 - 43 Qiu S, Asyhari T, Guo W S. Mobile molecular communications: positional-distance codes. In: *Proceedings of IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2016. 1–5

- 44 McGuinness D T, Giannoukos S, Marshall A, et al. Parameter analysis in macro-scale molecular communications using advection-diffusion. *IEEE Access*, 2018, 6: 46706–46717
- 45 McGuinness D T, Giannoukos S, Marshall A, et al. Experimental results on the open-air transmission of macro-molecular communication using membrane inlet mass spectrometry. *IEEE Commun Lett*, 2018, 22: 2567–2570
- 46 Abbaszadeh M, Thomas P J, Guo W S. Toward high capacity molecular communications using sequential vortex rings. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2018, 4: 39–42
- 47 Zhai H Y, Liu Q, Vasilakos A V, et al. Anti-ISI demodulation scheme and its experiment-based evaluation for diffusion-based molecular communication. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2018, 17: 126–133
- 48 Kim N R, Farsad N, Lee C, et al. An experimentally validated channel model for molecular communication systems. *IEEE Access*, 2019, 7: 81849–81858
- 49 Qiu S, Guo W S, Wang S Y, et al. A molecular communication link for monitoring in confined environments. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2014. 718–723
- 50 Giannoukos S, Marshall A, Taylor S, et al. Molecular communication over gas stream channels using portable mass spectrometry. *J Am Soc Mass Spectrom*, 2017, 28: 2371–2383
- 51 Giannoukos S, McGuinness D T, Marshall A, et al. A chemical alphabet for macromolecular communications. *Anal Chem*, 2018, 90: 7739–7746
- 52 McGuinness D T, Giannoukos S, Taylor S, et al. Experimental and analytical analysis of macro-scale molecular communications within closed boundaries. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2019, 5: 44–55
- 53 Ozmen M, Kennedy E, Rose J, et al. High speed chemical vapor communication using photoionization detectors in turbulent flow. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2018, 4: 160–170
- 54 Farsad N, Pan D, Goldsmith A. A novel experimental platform for in-vessel multi-chemical molecular communications. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2017. 1–6
- 55 Lee C, Koo B, Chae C. Demo: in-vessel molecular MIMO communications. In: *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops*, 2020
- 56 Kisseleff S, Schober R, Gerstacker W H. Magnetic nanoparticle based interface for molecular communication systems. *IEEE Commun Lett*, 2017, 21: 258–261
- 57 Unterweger H, Kirchner J, Wicke W, et al. Experimental molecular communication testbed based on magnetic nanoparticles in duct flow. In: *Proceedings of IEEE International Workshop Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2018
- 58 Ahmed D, Unterweger H, Fischer G, et al. Characterization of an inductance-based detector in molecular communication testbed based on superparamagnetic iron oxide nanoparticles. In: *Proceedings of IEEE SENSORS*, 2019. 1–4
- 59 Abbaszadeh M, Li W Q, Lin L, et al. Mutual information and noise distributions of molecular signals using laser induced fluorescence. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2019. 1–6
- 60 Khaloopour L, Rouzegar S V, Azizi A, et al. An experimental platform for macro-scale fluidic medium molecular communication. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2019, 5: 163–175
- 61 Kuscu M, Kiraz A, Akan O. Fluorescent molecules as transceiver nanoantennas: the first practical and high-rate information transfer over a nanoscale communication channel based on FRET. *Sci Rep*, 2015, 5: 1–6
- 62 Kuscu M, Akan O B. A physical channel model and analysis for nanoscale molecular communications with Förster resonance energy transfer (FRET). *IEEE Trans Nanotechnol*, 2012, 11: 200–207
- 63 Grebenstein L, Kirchner J, Peixoto R S, et al. Biological optical-to-chemical signal conversion interface: a small-scale modulator for molecular communications. *IEEE Trans Nanobiosci*, 2019, 18: 31–42
- 64 Grebenstein L, Kirchner J, Wicke W, et al. A molecular communication testbed based on proton pumping bacteria: methods and data. *IEEE Trans Mol Biol Multi-Scale Commun*, 2019, 5: 56–62
- 65 Huang Y, Wen M W, Yang L L, et al. Space shift keying for molecular communication: theory and experiment. In: *Proceedings of Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2019. 1–6
- 66 Huang Y, Chen X, Wen M W, et al. A rising edge-based detection algorithm for MIMO molecular communication. *IEEE Wirel Commun Lett*, 2020, 9: 523–527
- 67 Wang S Y, Guo W S, McDonnell M. Transmit pulse shaping for molecular communications. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2014. 209–210

- 68 Sarkar T, Ji Z, Kim K, et al. A survey of various propagation models for mobile communication. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2003, 45: 51–82
- 69 Huang Y, Wen M W, Lee C M, et. al. A two-way molecular communication assisted by an impulsive force. *IEEE Trans Ind Inform*, 2019, 5: 3048–3057
- 70 O'Shea T, Hoydis J. An introduction to deep learning for the physical layer. *IEEE Trans Cogn Commun Netw*, 2017, 3: 563–575
- 71 Wang T Q, Wen C K, Wang H Q, et al. Deep learning for wireless physical layer: opportunities and challenges. *China Commun*, 2017, 14: 92–111
- 72 Yilmaz H, Lee C, Cho Y, et. al. A machine learning approach to model the received signal in molecular communications. In: *Proceedings of IEEE International BlackSeaCom*, 2017. 1–5
- 73 Lee C, Yilmaz H, Chae C, et. al. Machine learning based channel modeling for molecular MIMO communications. In: *Proceedings of International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 2017. 1–5
- 74 Turan M, Kuran M, Yilmaz H, et al. MOL-eye: a new metric for the performance evaluation of a molecular signal. In: *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2018. 1–6
- 75 Nakano T, Eckford A, Haraguchi T. *Molecular Communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 76 Bilgin B A, Dinc E, Akan O B. DNA-based molecular communications. *IEEE Access*, 2018, 6: 73119–73129
- 77 Kuscü M, Dinc E, Bilgin B A, et al. Transmitter and receiver architectures for molecular communications: a survey on physical design with modulation, coding, and detection techniques. *Proc IEEE*, 2019, 107: 1302–1341
- 78 Luo T, Zheng R F, Song J, et al. A small-scale modulator of electric-to-biological signal conversion for synthetic molecular communications. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020. 1–7
- 79 Koo B, Kim H, Kwon J, et al. Deep learning-based human implantable nano molecular communications. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020. 1–7
- 80 Khalid M, Amin O, Ahmed S, et al. Communication through breath: aerosol transmission. *IEEE Commun Mag*, 2019, 57: 33–39
- 81 Khalid M, Amin O, Ahmed S, et al. Modeling of viral aerosol transmission and detection. *IEEE Trans Commun*, 2020, 68: 4859–4873
- 82 Zhang Z Q, Xiao Y, Ma Z, et. al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies. *IEEE Veh Technol Mag*, 2019, 14: 28–41

Survey on macro-scale molecular communication prototypes

Yu HUANG¹, Fei JI², Miaowen WEN^{2*}, Xuan CHEN², Yuankun TANG² & Beixiong ZHENG³

1. *School of Electronics and Communication Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;*
2. *School of Electronic and Information Engineering, South University of Technology, Guangzhou 510641, China;*
3. *Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117583, Singapore*

* Corresponding author. E-mail: eemwwen@scut.edu.cn

Abstract Molecular communication is an emerging communication paradigm that exploits the characteristics of information particles for message exchange. It can be served as an alternative for the scenarios where the propagation of conventional signal carriers, e.g., electromagnetic waves, is inapplicable. Current research of molecular communication focuses on the theoretical analysis, while it lacks the prototype experiments for validating the theory as well as advancing the practical applications. The first part defined molecular communication systems based on the transmitter, channel, and receiver. Then, the progress of macro-scale prototype design is reviewed and categorized according to the channel type. Finally, based on the difference between the models in theory and prototype, the constraint of theoretical studies, the importance of prototype experiments, and the future research directions are discussed.

Keywords diffusion, fluid dynamics, macro-scale, molecular communication, prototype

includes molecular and wireless communications.

Yu HUANG was born in 1993. He received his B.S. degree in communication engineering from Harbin University of Science and Technology, Harbin, China, in 2016, and the Ph.D. degree from South China University of Technology, Guangzhou, China. He is currently an associate professor at Guangzhou University, Guangzhou, China. He was the winner in data bakeoff competition at IEEE Communication Theory Workshop (CTW) 2019. His research interest

She was a visiting scholar with University of Waterloo, Canada, from June 2009 to June 2010. She worked in City University of Hong Kong as a research assistant from March 2001 to July 2002 and a senior research associate from January 2005 to March 2005. She is currently a Professor at the School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology. Her research focuses on wireless communication systems and networking.

Fei JI was born in 1970. She received her B.S. degree in applied electronic technologies from Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, and the M.S. degree in bioelectronics and Ph.D. degree in circuits and systems both from South China University of Technology, Guangzhou, China, in 1992, 1995, and 1998, respectively.

ests include index modulation, non-orthogonal multiple access, physical layer security, and molecular communications.

Miaowen WEN was born in 1987. He received the B.S. degree from Beijing Jiaotong University, Beijing, China, in 2009, and the Ph.D. degree from Peking University, Beijing, China, in 2014. From 2012 to 2013, he was a visiting student research collaborator at Princeton University, Princeton, NJ, USA. He is currently an associate professor at South China University of Technology, Guangzhou, China. His research inter-

at IEEE Communication Theory Workshop (CTW) 2019. Her main research interests include index modulation and molecular communications.

Xuan CHEN was born in 1996. She received her B.S. degree from Wuhan University of Technology, Wuhan, China, in 2017. She is currently pursuing her Ph.D. degree at South China University of Technology, Guangzhou, China. In August 2019, she was a visiting student for molecular communication in Yonsei University, Seoul, South Korea. She was the winner in data bakeoff competition