

# 分子通信：原理、应用与挑战

钟涛

重庆邮电大学通信与信息工程学院

随着纳米技术的发展，使得分子通信技术成为了一个必然需求。因此，分子通信作为一个跨学科研究领域，越来越受到人们的关注与研究，不过人们对它的研究还处于起步阶段。所以，对分子通信展开研究将对促进它的发展具有重要意义。本文作为一篇概述性文章，首先简述了分子通信的定义，并比较了它与传统通信在主要特性上的差异，然后简单介绍了分子通信的原理与架构，接着对分子通信信道和分子通信的收发机进行了简述，最后，对分子通信的应用前景及其所面临的挑战进行了概述。

## 1 什么是分子通信

顾名思义，分子通信就是以分子作为信息载体在发射机和接收机之间进行通信的一种技术，它是一种短距离通信技术。它在生物医学、工业、环境和军事等领域具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。因此，它也成为近些年的研究热点之一，使得许多学者对其展开相应的研究。而对分子通信的研究最关键就在于对系统的设计与数学建模，在文献[2]中将分子通信系统定义为满足以下条件的系统：（1）使用生物或人工合成的分子来构建分子通信组件和系统；（2）每个分子通信过程都是可以人工控制的；（3）分子被用作信息载体，并且生物化学反应表示信息的解码。

分子通信作为一种新的通信技术，它与利用电磁波作为信息载体的传统通信技术有所不同，它们之间的主要特性对比如下表所示<sup>[2]</sup>：

表 1 传统通信与分子通信的主要特性对比

主要特性	传统通信	分子通信
信息载体	电磁波	分子
信号类型	电磁或光信号	生物化学信号
传播速度	光速 ( $3 \times 10^5$ km/s)	速度慢 (几微米每秒)
传播距离	长 (从米到千米)	短 (从纳米到米)
传播环境	空间或电缆	液体或气体
编码信息	语音、文本或视频	现象或化学状态
接收机行为	数字信息解码	生化反应
能量消耗	高	极低

## 2 分子通信的原理与架构

图 1 展示了包括关键系统组件的通用分子通信架构，这些系统组件主要包含发送器（发射机）、分子通信接口、分子传播系统和接收器（接收机）<sup>[2]</sup>。发送器首先生成分子，将信息编码到分子上去，接着将信息分子发射到传播环境中。其中，发送器可以编码有关分子类型或浓度的信息。而诸如蛋白质、多肽、脱氧核糖核酸(DNAs)和离子的生化分子可作为信息分子。另外，可以通过对真核细胞进行遗传修饰和人工构建生物装置以控制编码这两种可能的方法来创建发送器。

分子通信接口用来封装发射出的信息分子，它充当分子容器以隐藏信息分子在传播过程中的生化和物理特性。其中，脂质双层囊泡就可以作为分子通信接口用来封装信息分子。而在接收器处将对封装的信息分子进行解封。

分子传播系统通过传播环境被动或主动地将信息分子（或封装信息分子的囊泡）从发送器传输到适当的接收器。传播环境通常是细胞内和细胞间的水溶液。被动传输是指基于扩散的分子传播，而主动传输是指具有能量消耗的定向分子传播。构建分子传播系统的方法通常使用布朗运动和生物分子马达来分别被动和主动地传输信息分子。接收器选择性地接收已解封的信息分子，并对接收到的信息分子进行生化反应，这个生化反应就表示信息的解码。另外，可以通过对真核细胞进行遗传修饰和人工构建生物装置以控制生化反应这两种可能的方法来创建接收器。

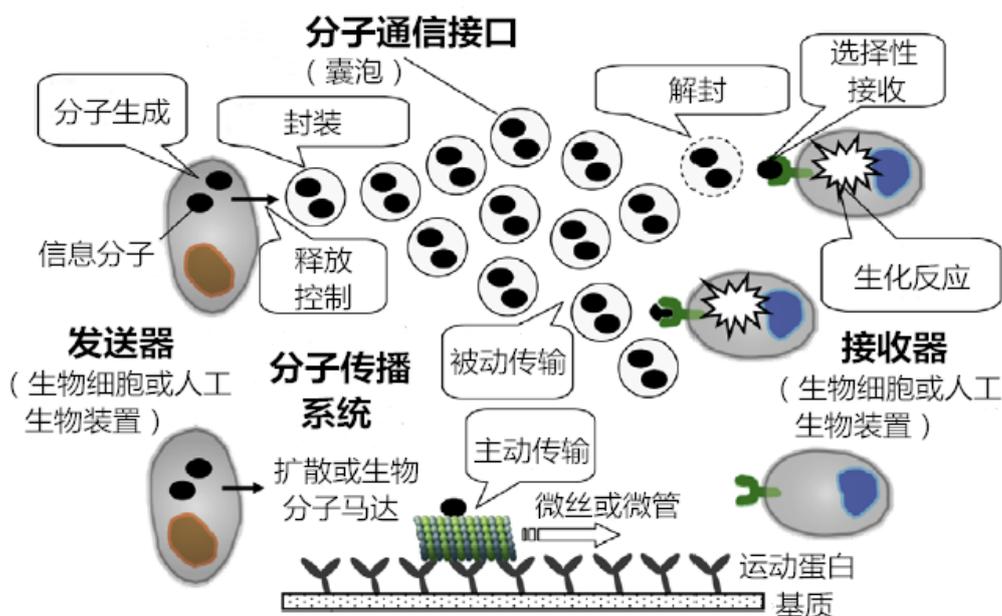


图 1 通用的分子通信架构

如果要构建一个实际的分子通信系统，则需要使用一些适当的技术和方法。例如，使用嵌入连接蛋白的脂质体的分子通信接口；使用微管运动蛋白和 DNA 杂交的主动分子传播系统；使用嵌入双肽脂质的巨型脂质体的发送器和接收器，并且它们将彼此兼容，可以集成到单个系统中。这样的分子通信系统模型如图 2 所示<sup>[2]</sup>。

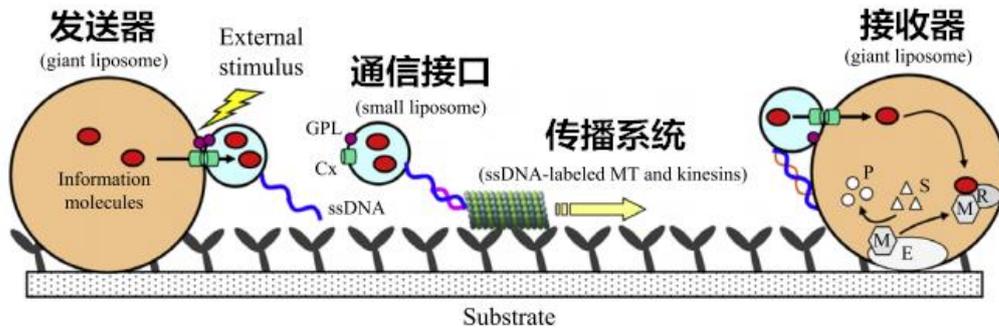


图 2 分子通信系统模型

另外，实现分子通信系统可能还需要如图 3 所示的物理组件<sup>[3]</sup>。在发射机端，需要物理过程来生成或存储信息粒子，还需要一种机制来控制信息粒子的释放，最后，还需要有一个处理单元来控制发射机内的不同过程。这个处理单元可以通过化学途径、微控制器或其它方式进行操作。此外，为了正常工作，发射机可能需要能源，分子通信发射机通常使用生物能，例如细胞新陈代谢释放的能量。

当携带信息的粒子在信道中释放后，需要一种传输机制将其传输到接收机端。在接收机端，必须有可以测量接收信息粒子的某些到达特性的传感器或检测器。这些特性可以是信息粒子的存在与否，它们的浓度，它们的到达时间，或任何其它可测量的参数。如果在发射机端使用了编码技术，则在接收机端就需要一个中央处理单元来解码和解密接收到的信号。最后，接收机可能也需要能源才能正常工作，分子通信接收机通常使用化学能，例如化学反应释放的能量。

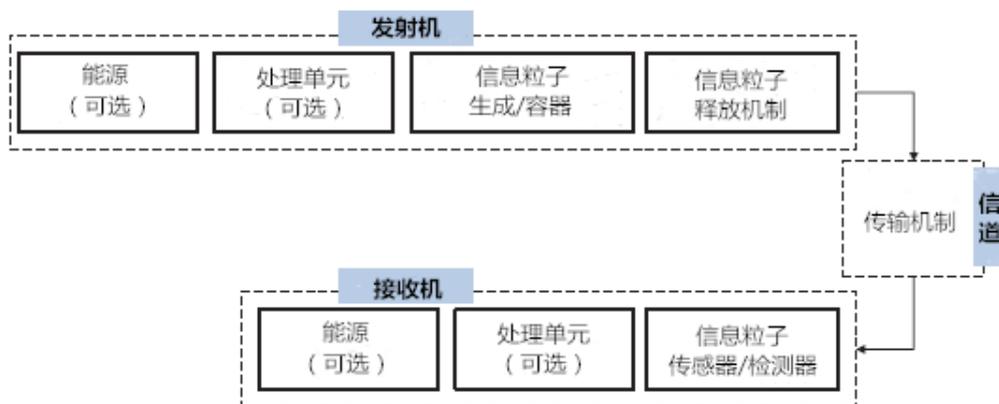


图 3 分子通信所需的物理组件

经过学者们的不断努力，许多种传输机制被提出，而基于自由扩散的传输机制就是其中一种。扩散，也被称为布朗运动，指的是粒子在其附近与其它分子碰撞时的随机运动。通过这种随机运动，可以利用信道环境中已经存在的热能，将携带信息的粒子从发射机传输到接收机。因此，基于自由扩散的传输机制不需要外部能量源。此外，还有基于分子马达的传输机制、基于反应扩散的传输机制和基于细菌马达的传输机制<sup>[3]</sup>。

### 3 分子通信信道

信道是指发射信号从发射机传输到接收机的环境。在传统的通信系统中，信道通常是电线或自由空间，其中传输的信号分别是电流或电磁波。而在分子通信中，信道是水环境或者气体环境，微小的信息粒子可以在其中自由传播。分子通信信道是分子通信系统中的一个重要组成部分，目前，人们对分子通信信道的研究尚处于理论阶段。如图 4 所示，人们通常基于图中的四种理论对分子通信信道展开研究，但都没有通过相应的实验来对这四种理论进行验证。而在文献[4]中，作者针对分子通信信道建模所存在的一些问题，从而展开了对分子通信信道的研究，分别研究了基于流体介质的分子通信扩散信道、基于神经元信号的分子通信传导信道、基于流体介质和神经元的分子通信混合信道以及基于钙信号的分子通信传导信道。文献[4]选取了几种重要的生物信道作为建模的实例，并且在理论和仿真中都考虑了真实的生物现象和实验参数。

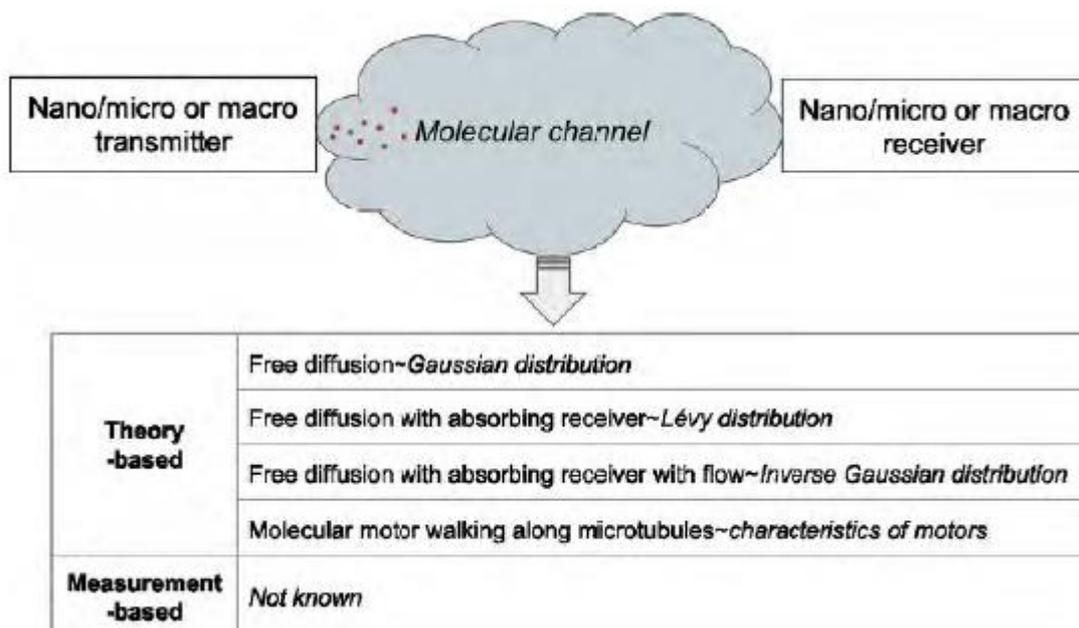
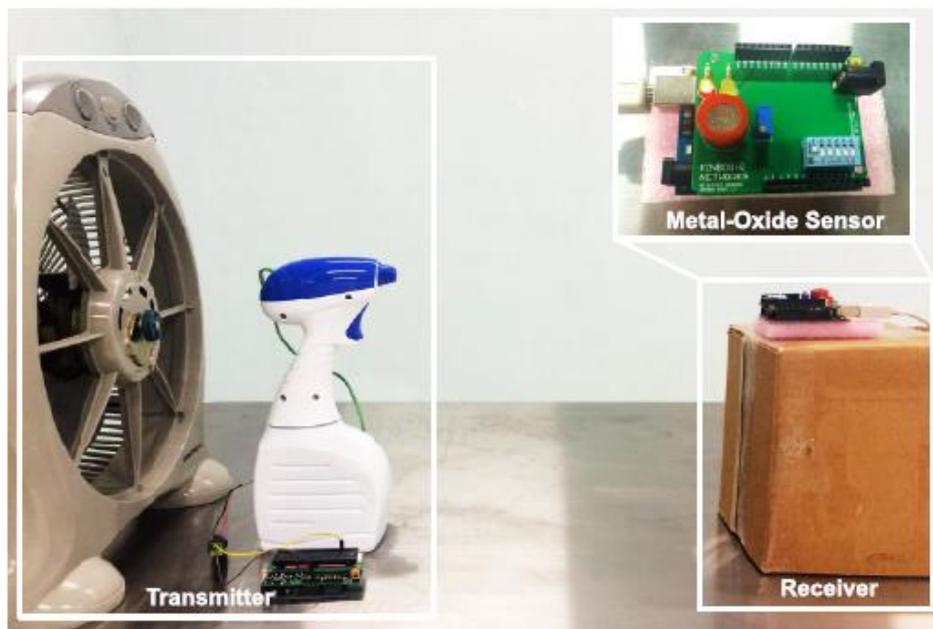


图 4 基于理论和基于测量的分子信道

目前大多数对分子通信信道的研究工作都是在一些完美假设的前提下，对分子通信信道进行理论分析，并没有进行实验评估，但也有一些研究工作对分子通信信道进行了实验验证，文献[5]就是其中之一。在文献[5]中提及到了一个用于分子通信的桌面实验台，如图 5(a)所示。其中，发射机由用于释放信息分子的喷雾器、用于辅助传输的风扇以及微控制器组成，该微控制器带有 LCD 显示屏和用于控制喷雾器的按钮。另外，被喷洒的化学物质是异丙醇，即异丙醇作为信息分子，当喷洒释放这些分子时，将用风扇产生气流，从而使得它们在空气中进行传输。而接收机由酒精传感器和读取传感器数据的微控制器组成。另外，由于异丙醇作为信息分子，因此，采用 MQ-3 这种半导体金属氧化物气体传感器用于在接收机处进行检测，并且仅检测酒精分子。其中，MQ-3 传感器的结构示意图如图 5(b)所示，薄薄的二氧化锡 ( $\text{SnO}_2$ ) 层覆盖在氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 管上。在氧化铝内部是由镍铬合金制成的加热线圈，它用于电阻加热。而接收机端的微控制器使用模数转换器读取传感器数据，然后对这些数据进行分析，并通过串行端口将其发送到计算机。



(a)



(b)

图 5 (a) 分子通信的桌面实验台 (b) MQ-3 传感器结构

## 4 分子收发信机

### 4.1 分子发射机

分子通信的发射机物理结构如图 6 所示<sup>[6]</sup>。发射机利用分子的物理特性编码信息，并相应地释放信息分子，这些物理特性包括浓度，类型，比率，顺序或释放时间。为此，需要通过信源编码和信道编码将要传输的信息映射到一个比特序列中，这样是为了分别用较少的比特数表示信息，以及向信息中引入额外的比特，以提供错误纠正的能力。然后，调制器将对分子特性中的信息进行编码，并根据预定的调制方案控制信息分子的释放。最后，需要能源和信息分子生成器或容器来分别为发射机提供能量和信息分子。对于分子通信发射机的物理设计，可行的方法主要分为以下两类：基于纳米材料的人工分子通信发射机；基于合成生物学的生物分子通信发射机。

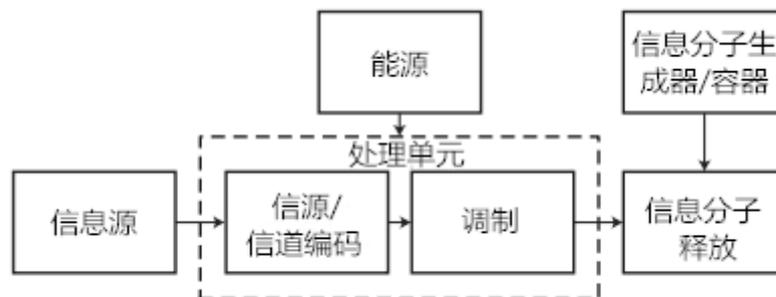


图 6 分子通信的发射机物理结构

### 4.2 分子接收机

分子通信接收机的物理结构如图 7 所示<sup>[6]</sup>。分子通信接收机识别目标分子是否到达它的附近并检测以这些分子的浓度、类型或释放时间等物理特性进行编码的信息。为此，它需要分子接收天线，该天线由一个生物识别单元和一个传感器单元组成。其中，生物识别单元会进行一个对携带信息的分子具有特定选择性的分子识别事件，例如，它选择性地与这些靶分子反应。然后，传感器单元根据这个分子反应产生一个可处理的信号，例如电信号或生化信号。最后，处理单元根据分子接收机天线的输出来检测传输信息。同样，对于分子通信接收机的物理设计，可行的方法主要分为以下两类：基于工程菌的合成基因电路的生物接收机；基于纳米材料的人工分子通信接收机。

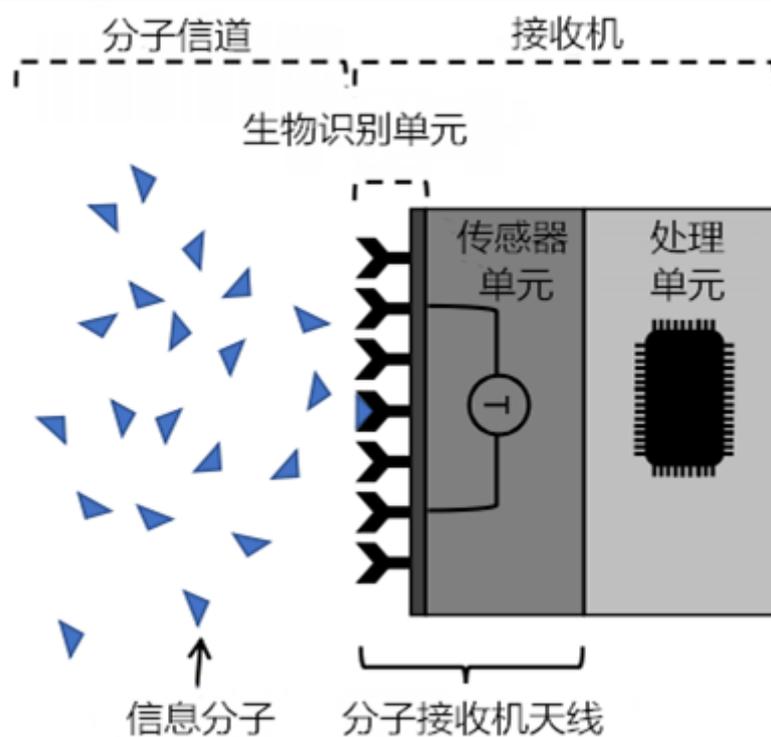


图7 分子通信接收机的物理结构

## 5 应用前景

分子通信作为一种新颖的通信技术，它在许多领域具有非常大的应用潜力。比如，它可以应用于环境、工业、军事和生物医学等领域。在环境领域方面，使用分子通信技术可以解决一些当前技术无法解决的问题，比如生物降解、生物多样性控制和空气污染监测；在工业领域方面，分子通信技术可以应用于食品和水质监测；在军事领域方面，分子通信技术可以应用于设计与制造先进的伪装设备和军服，也可以应用于核生化的监测与防御；在生物医学领域方面，通过使用分子通信技术，能够有力地支持人体的免疫系统功能，能够对疾病的早期诊断和治疗提供有力帮助，例如，智能地实现定向药物投送，为治疗代谢疾病和缓解神经变性疾病提供有效帮助<sup>[7]</sup>，此外，还能够实现持续的健康监测，如进行心脏监测和癌症监测。除了以上提及到的四个主要的领域之外，分子通信技术还在其它的领域中发挥着巨大作用，比如，分子通信技术可以应用于片上实验室，从而实现在一块芯片上对医学生物样本进行检测和分析，另外，分子通信技术还可以通过提供生物分子计算设备之间的信息互联方式，从而更加充分地发挥设备的并行计算能力。

## 6 面临挑战

目前，人们对分子通信的研究涉及各个方面，如图 8 所示<sup>[3]</sup>。从宏观和微观这两个尺度上来看，人们都对信息粒子、传输机制、发射机的机制和组件、接收机的机制和组件以及潜在的应用展开了相应的研究；而在通信工程方面上，人们又可以对信道模型、调制技术、纠错码、架构与协议以及仿真工具展开相关研究；最后，人们还可以从整体上研究分子通信的实际系统和实验系统。

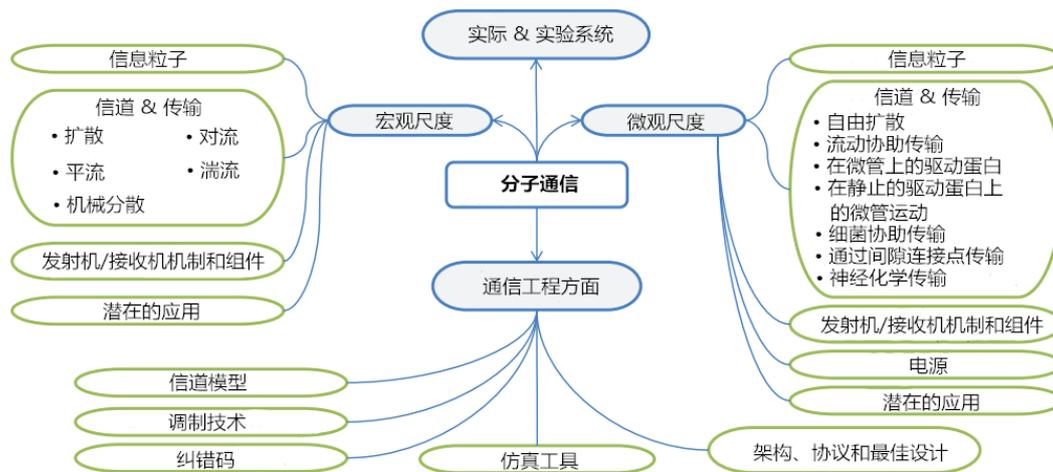


图 8 分子通信的各个方面

在过去几年中，分子通信受到了人们广泛的关注与研究。不过尽管人们对分子通信信道的信息理论模型和分子通信应用的系统理论模型进行了大量的研究，但是这些研究工作大多数都依赖于不切实际的假设。因此，想要在实际中运用分子通信技术，还面临着许多挑战。比如，许多模型假设发射机是完美的，但实际上却并不是。对于基于纳米材料的分子通信发射机而言，分子泄露和分子容器或生成器是两个重要的设计挑战；而对于生物分子通信发射机而言，设计的主要挑战却在于所涉及到的生物元素的复杂性；此外，能效也是分子通信发射机设计的另一个重要挑战。另外，许多模型也假设接收机能够选择性地对多个分子进行完美检测，但在实际中也并非如此。因此，分子通信的发射机设计也面临着挑战，此外，分子通信在调制技术、信道编码技术和检测技术上也都面临着一些挑战。

### 参考文献

- [1] Akyildiz I F, Brunetti F, Cristina B. Nanonetworks: A new communication paradigm[J]. Computer Networks, 2008, 52(12):2260-2279.

- [2] Hiyama S, Moritani Y. Molecular communication: Harnessing biochemical materials to engineer biomimetic communication systems[J]. Nano Communication Networks, 2010, 1(1):20-30.
- [3] Farsad N, Yilmaz H B, Eckford A, et al. A Comprehensive Survey of Recent Advancements in Molecular Communication[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3):1887-1919.
- [4] 何鹏. 分子通信信道模型关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [5] Kim N R, Farsad N, Lee C M, et al. An Experimentally Validated Channel Model for Molecular Communication Systems [J]. IEEE Access, 2019,7:81849-81858.
- [6] Kuscu 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[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(7):1302-1341.
- [7] 黎作鹏, 张菁, 蔡绍滨, 等. 分子通信研究综述[J]. 通信学报, 2013, 34(5):152-167.

**作者简介:** 钟 涛, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生, 研究方向为无线通信与信号处理。



临菲信息技术港



临菲信息技术港公众号



临菲学堂