

基于用户间干扰的分子通信模型的信道容量分析

程 珍 林 飞 赵慧婷 章益铭

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 在扩散的多用户分子通信模型中,被释放的分子遵循布朗运动规则,不可避免地存在分子间码间干扰 ISI (Inter-Symbol Interference) 和用户间干扰 IUI (Inter-User Interference)。因此,如何提高该系统的信道容量是目前分子通信模型研究的挑战之一。针对扩散的 OOK (On-Off Keying) 调制的多用户分子通信模型,分析了 ISI 和 IUI,并通过最小平均错误概率准则得到了接收方纳米机器检测过程中的最优判决阈值,从而优化了信道容量。最后使用 MATLAB 仿真展示了不同的参数对该分子通信模型的信道容量性能的影响。仿真结果表明,通过设置适当的先验概率、增加扩散系数和时隙持续时间、减少发送方纳米机器和接收方纳米机器之间的距离和用户数,能够提高基于用户间干扰的分子通信模型的信道容量,并降低误码率。

关键词 分子通信,用户间干扰,最优判决阈值,信道容量

中图法分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.04.018

Analysis of Channel Capacity of Molecular Communication Model Based on Inter-user Interference

CHENG Zhen LIN Fei ZHAO Hui-ting ZHANG Yi-ming

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract In the diffusive multi-user molecular communication model, the released molecules follow Brownian motion rules, the Inter-Symbol Interference (ISI) and Inter-User Interference (IUI) among the molecules inevitably exist. Therefore, how to increase the channel capacity of system is a challenge in the current research on the molecular communication model. For the diffusive multi-user molecular communication model with On-Off Keying (OOK) modulation, the ISI and IUI were analyzed. The minimum average error probability criterion was used to obtain the optimal decision threshold in the detection process for the receiver nanomachine, and then the channel capacity was optimized. Finally, MATLAB simulations were used to demonstrate the effects of different parameters on the channel capacity performance of this molecular communication model. The simulation results show that by setting appropriate prior probability, increasing the diffusion coefficient and time slot duration, reducing the distance between the transmitter nanomachine and the receiver nanomachine and the number of users, the channel capacity of the molecular communication model based on IUI can be improved, and the bit error rate is reduced.

Keywords Molecular communication, Inter-user interference, Optimal decision threshold, Channel capacity

1 引言

纳米技术^[1]被定义为研究结构尺寸在 1~100 nm 范围内的材料的性质的技术,在生物医学、工业、环境、军事等领域有着广阔的应用前景。纳米机器^[2]则是纳米技术中执行任务最基本的单位。然而,单个纳米机器的功能和能力相当有限,Islam 等^[3]和 Akyildiz 等^[4]提出了通过互连纳米机器构造纳米网络的想法,通过合作共享信息达到实现复杂任务的目的。

到目前为止,研究者提出了可用于纳米网络的 4 类不同的通信机制^[4],包括纳米机械式通信、声波通信、电磁通信和分子通信。分子通信是纳米机器之间通信的新兴技术^[5],它利用生物化学分子作为信息载体,来实现分子在生物环境中的通信。相比其他通信,分子通信具有诸多优点,比如分子通

信的信息载量大^[6],大肠杆菌的染色体存储的信息大约是相同区域硅基技术的两万倍;具有生物兼容性,纳米机器可以直接与细胞、组织、器官进行作用^[7]而没有排异性;分子通信系统对能量的利用率极高,肌球蛋白能以接近 100% 的效率使用化学能^[8]。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^[9]。

近年来,基于扩散的分子通信模型^[10]引起了广大学者的关注。在基于扩散的分子通信模型中,发送方纳米机器 Tx (Transmitter Nanomachine) 将信息编码在分子上,分子通过流体介质进行扩散,接收方纳米机器 Rx (Receiver Nanomachine) 接收到分子后进行解码以得到信息。基于扩散的分子通信系统的研究面临较多的挑战,其中之一是在符号间干扰 (Inter-Symbol Interference, ISI) 和分子噪声影响的情况下,如

投稿日期:2018-03-28 返修日期:2018-07-03 本文受国家自然科学基金(61472367),浙江省自然科学基金(LY19F020029)资助。

程 珍(1981-),女,博士,副教授,主要研究方向为分子通信与纳米网络,E-mail:chengzhen@zjut.edu.cn(通信作者);林 飞(1992-),男,硕士,主要研究方向为分子通信与纳米网络;赵慧婷(1992-),女,硕士,主要研究方向为分子通信与纳米网络;章益铭(1993-),硕士生,主要研究方向为分子通信与纳米网络。

何提高该系统的信道容量。Nakano 等^[11]提出了具有冗余分子的扩展调制方案,分析了分子通信在一维环境中的信道容量。Hsieh 等^[12]提出了用于分子通信的异步通信方案,并以信道容量作为性能指标。Liu 等^[13]基于开关键控(On-Off Keying, OOK)调制机制建立了配体-受体结合的分子传播模型,推导了信道容量表达式。Pierobon 等^[14]考虑分子噪声,分析了扩散系数、温度等因素对信道容量的影响。Mustam 等^[15]假设分子在多层信道扩散,通过延长信号持续时间来减少符号间的干扰,对信道容量进行了优化。Meng 等^[16]基于扩散的二元分子通信模型,考虑了多个时隙对当前时隙的干扰,对信道容量进行了优化。Awan 等^[17]假设接收方纳米机器使用酶促反应,分析了基于扩散的分子通信的信道容量,证明酶促反应可以显著降低噪声并提高信道容量。Bicen 等^[18]基于香农信道容量定理和菲克扩散定理,研究了单个发送方纳米机器与多个接收方纳米机器模型的信道容量。

然而,目前的基于分子扩散的通信中的用户间干扰(Inter-User Interference, IUI)对通信系统的性能的影响没有得到很好的研究。Meng 等^[19]提出了基于多输入多输出的分子通信模型,考虑了 IUI 并分析了该模型的误码率,但没有考虑 ISI 类型干扰的影响。Jiang 等^[20]基于 IUI 利用分子通信的概率密度模型,并对该系统的误码率进行了研究,但该模型只包括两个发送方纳米机器和一个接收方纳米机器,并只考虑了一个时隙的干扰,不具有一般性。本文的工作填补了该空缺,利用分子扩散浓度模型分析了在多时隙 ISI 和 IUI 两种类型的干扰下分子通信的信道容量,该研究对分子通信的发展有着非常重要的意义。

2 系统模型

基于扩散的点到点分子通信系统的通信过程包括编码、发送、传输、接收和解码 5 个部分。传输机制如下:发送方纳米机器 Tx 根据分子的物理或化学特性对分子进行编码,然后在通信介质中释放分子,释放的分子遵循布朗运动在介质中自由扩散,最终,部分分子到达接收方纳米机器 Rx 并被 Rx 接收,Rx 再根据接收的分子类型进行解码并确定接收的比特信息。基于扩散的点到点分子通信的通信过程如图 1 所示,分子在介质中传输的时间被分为大小相同的时间段,每个时间段被定义为一个时隙。

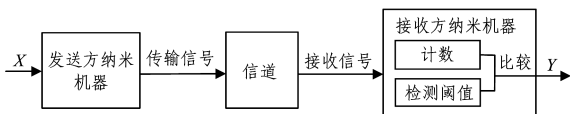


图 1 基于扩散的点到点分子通信模型的通信过程

Fig. 1 Communication process of diffusion-based point-to-point molecular communication model

本文中,输入和输出均是二进制信息比特 1 或 0,并且采用 OOK 作为调制技术。发送方纳米机器 Tx 在时隙开始释放一定数量的分子,表示输入比特 X 为 1;没有释放任何分子表示输入比特 X 为 0。释放的分子在介质中扩散并遵循布朗运动规则,当其到达接收方纳米机器 Rx 时,会立即被 Rx 吸收并从介质中除去,不再存在于生物环境中。接收方纳米机器在每个时隙累加吸收分子的数量,将该数量和定义的阈值

进行比较,从而确定输出比特 Y。

基于用户间干扰的分子通信模型由 M 个发送方纳米机器 Tx 和一个接收方纳米机器 Rx 构成。如图 2 所示, Tx_k ($1 \leq k \leq M$) 表示第 k 个发送方纳米机器, Rx 表示接收方纳米机器, Tx_k 与 Rx 的距离为 r_k , 每个 Tx_k 释放的分子类型是相同的,同时分子的运动遵循布朗运动规则。本文考虑分时隙的基于用户间干扰的分子通信系统,对于每个 Tx_k ,在前面时隙中释放的分子可能在当前时隙到达,从而产生 ISI。每个时隙开始时 Tx_k 释放分子,那么其他 Tx_k ($i \neq k$) 释放的分子将会对 Tx_k 造成 IUI。因此,对于基于用户间干扰的分子通信系统,ISI 和 IUI 的产生对系统的性能有非常重要的影响。

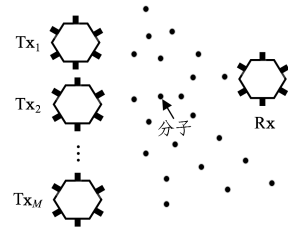


图 2 基于用户间干扰的系统模型

Fig. 2 System model based on Inter-User Interference

用 $C(r_k, t)$ 表示 Tx_k 与 Rx 之间距离为 r_k 时在 t 时刻释放的分子的浓度函数,根据菲克扩散第二定律,分子浓度的分布函数随时间变化(非稳态扩散)^[21],其公式如下:

$$\frac{\partial C(\vec{r}_k, t)}{\partial t} = D \nabla^2 C(\vec{r}_k, t) \quad (1)$$

假设分子被接收方纳米机器接收的事件发生在离散时间点,所有发送方纳米机器 Tx_k ($1 \leq k \leq M$) 和接收方纳米机器 Rx 之间的时间是同步的。设信息传输的时间为 T ,划分为 n 个时隙,每个时隙的持续时间 T_s 即为 T/n 。令当前时隙为第 n 个时隙,当只考虑符号间干扰对 Tx_k 的影响时,在 T 时刻 Rx 处的分子浓度可以通过在第 j ($1 \leq j \leq n$) 个时隙释放并在第 n 个时隙到达的分子数累加得到。因此得到式(1)的解^[21]为:

$$C(r_k, t) = \sum_{j=1}^n X_k[j] \frac{Q_{jk}}{(4\pi D(t-jT_s))^{\frac{w}{2}}} \exp\left(-\frac{r_k^2}{4D(t-jT_s)}\right) \quad (2)$$

其中, D 为分子在介质中的扩散系数; $X_k[j]$ 表示 Tx_k 在第 j 个时隙输入的比特; Q_{jk} 表示 Tx_k 在第 j 个时隙释放的分子数,为一系列独立同分布的连续随机变量。我们假设同一个发送方纳米机器释放的分子数服从同一个正态分布,与 j 无关,即 $Q_{jk} \sim N(\mu_{Q_k}, \sigma_{Q_k}^2)$, 其中, μ_{Q_k} 和 $\sigma_{Q_k}^2$ 分别是第 k 个发送方纳米机器释放分子数的均值和方差。 w 为空间维数,本文中 w 取 3, $t \in [(n-1)T_s, nT_s]$ 。

在式(2)的基础上考虑多用户的情况, T 时刻 Rx 处的分子浓度可以通过 M 个用户在第 j ($1 \leq j \leq n$) 个时隙释放并在第 n 个时隙到达的分子数累加得到,根据式(2)可得:

$$C(t) = \sum_{k=1}^M C(r_k, t) = \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^n X_k[j] \frac{Q_{jk}}{(4\pi D(t-jT_s))^{\frac{w}{2}}} \exp\left(-\frac{r_k^2}{4D(t-jT_s)}\right) \quad (3)$$

令 Z_j 表示从 jT_s 到 $(j+1)T_s$ 时间段内接收方纳米机器 R_x 处的浓度函数,其定义如下:

$$Z_j = \int_{jT_s}^{(j+1)T_s} C(t) dt, t > 0 \quad (4)$$

3 信道容量分析

用 $a_j(r_k)$ 表示 T_{x_k} 在前 j 个时隙释放的分子在当前时隙到达的概率^[21],其表达式如式(5)所示:

$$a_j(r_k) = \int_0^{T_s} \frac{1}{(4\pi D(t+jT_s))^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{r_k^2}{4D(t+jT_s)}\right) dt \quad (5)$$

由式(5)可知, $a_j(r_k)\mu_{Q_k}$ 表示 T_{x_k} 在前 j 个时隙释放的分子在当前时隙到达的分子数。令当前时隙为第 n 个时隙,当研究 T_{x_k} 与 R_x 之间的通信情况时,需要考虑 T_{x_k} 前 $(n-1)$ 个时隙对其产生的 ISI 以及其余 $(M-1)$ 个 T_{x_i} ($1 \leq i \leq M, i \neq k$) 对其产生的 IUI。接收方纳米机器 R_x 在第 j 个时隙的浓度用 $y[j]$ 表示, T_{x_k} 在第 j 个时隙输入的比特用 $X_k[j]$ 表示,在 $(M-1)$ 个 T_{x_i} ($1 \leq i \leq M, i \neq k$) 用户间干扰作用下, $y[j]$ 由以下 4 部分构成:

1) T_{x_k} 在当前时隙释放的并在当前时隙接收到的分子数,即 $a_0(r_k)\mu_{Q_k}X_k[n]$;

2) T_{x_k} 在前面时隙释放的并在当前时隙接收到的干扰分子数之和,即 $\sum_{q=1}^{n-1} a_q(r_k)\mu_{Q_k}X_k[n-q]$;

3) 其余发送方纳米机器 T_{x_i} ($1 \leq i \leq M, i \neq k$) 在当前时隙释放并在当前时隙被接收方纳米机器接收的干扰分子数之和,即 $\sum_{i=1, i \neq k}^M a_0(r_i)\mu_{Q_i}X_i[n]$;

4) 其余发送方纳米机器 T_{x_i} ($1 \leq i \leq M, i \neq k$) 在前面时隙释放并在当前时隙被接收方纳米机器接收的干扰分子数之和,即 $\sum_{q=1}^{n-1} \sum_{i=1, i \neq k}^M a_q(r_i)\mu_{Q_i}X_i[n-q]$ 。

$y[j]$ 为以上 4 项总和,表示如下:

$$y[j] = a_0(r_k)\mu_{Q_k}X_k[n] + \sum_{q=1}^{n-1} a_q(r_k)\mu_{Q_k}X_k[n-q] + \sum_{i=1, i \neq k}^M a_0(r_i)\mu_{Q_i}X_i[n] + \sum_{q=1}^{n-1} \sum_{i=1, i \neq k}^M a_q(r_i)\mu_{Q_i}X_i[n-q] = \sum_{i=1}^M a_0(r_i)\mu_{Q_i}X_i[j] + \sum_{q=1}^{n-1} \sum_{i=1}^M a_q(r_i)\mu_{Q_i}X_i[n-q] \quad (6)$$

我们将信息论的方法用于检测器的设计。如图 3 所示, X_k 和 Y 分别代表当前时隙下 T_{x_k} 的输入和 R_x 的输出。 H_0 和 H_1 分别表示假设 T_{x_k} 输入为 0 和 1 的情况。令 P_{D_k} 表示检测率,即 T_{x_k} 输入比特与 R_x 输出比特均为 1 的概率。令 P_{F_k} 表示误报率,即 T_{x_k} 输入比特为 0 而 R_x 输出比特为 1 的概率。

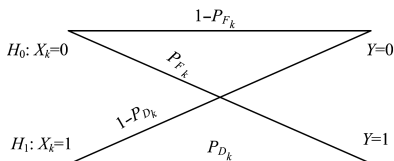


图 3 基于扩散的分子通信模型的假设检测信道

Fig. 3 Hypothetical detection channel of diffusion-based molecular communication model

信息论中检测率和误报率的定义^[22]如下:

$$P_{D_k} = P(Y=1 | X_k=1)$$

$$P_{F_k} = P(Y=1 | X_k=0)$$

$$1 - P_{D_k} = P(Y=0 | X_k=1)$$

$$1 - P_{F_k} = P(Y=0 | X_k=0)$$

根据式(4)中对 Z_j 的定义,二元假设检验问题可以写成以下形式:

$$H_0: Z_j \sim f_{Z_j}^0(Z_j)$$

$$H_1: Z_j \sim f_{Z_j}^1(Z_j)$$

其中, $f_{Z_j}^1(Z_j)$ 和 $f_{Z_j}^0(Z_j)$ 分别表示 Z_j 在 H_0 和 H_1 假设条件下的概率密度函数。

当 n 趋于无穷时, $a_j(r_k)Q_{jk}X_k[j]$ 是相互独立的随机变量,满足林德伯格条件(Lindeberg condition)中心极限定理^[22], Z_j 收敛于正态分布。本文中的二元假设检验问题可以写为:

$$H_0: Z_j \sim N(\mu_0, \sigma_0^2)$$

$$H_1: Z_j \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$$

其中, μ_0 和 σ_0^2 分别表示 H_0 事件的均值和方差, μ_1 和 σ_1^2 分别表示 H_1 事件的均值和方差。 $f_{Z_j}^0(Z_j)$ 和 $f_{Z_j}^1(Z_j)$ 分别表示 Z_j 服从的正态分布 $H_0: Z_j \sim N(\mu_0, \sigma_0^2)$ 和 $H_1: Z_j \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 对应的概率密度函数,表示如下:

$$f_{Z_j}^0(Z_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} e^{-\frac{(Z_j - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}}$$

$$f_{Z_j}^1(Z_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} e^{-\frac{(Z_j - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (10)$$

在式(4)的基础上,考虑多时隙 ISI 和 IUI 的干扰分子的浓度。根据式(6)可以得到 Z_j 的表达式如下:

$$H_0: Z_j = \sum_{i=1, i \neq k}^M a_0(r_i)\mu_{Q_i}X_i[j] + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} a_j(r_i)\mu_{Q_i}X_i[j]$$

$$H_1: Z_j = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^n a_j(r_i)\mu_{Q_i}X_i[j]$$

(11)

假设每个时隙开始时 T_{x_k} 输入比特 1 的概率为 p_k , 则输入比特 0 的概率为 $(1-p_k)$ 。根据式(11)可以得到 μ_0 和 μ_1 , 表示如下:

$$\mu_0 = \mu_{Q_k} p_k \sum_{j=1}^{n-1} a_j(r_k) + \sum_{i=1, i \neq k}^M \mu_{Q_i} p_i \sum_{j=0}^{n-1} a_j(r_i)$$

$$\mu_1 = \mu_{Q_k} a_0(r_k) + \mu_0$$

用 $p(Q_{jk})$ 表示 T_{x_k} 在第 j 个时隙输入比特 1 时释放 Q_{jk} 个分子的概率,其中, Q_{jk} 的可能取值为 $1, 2, 3, \dots$ 。根据离散型随机变量 Q_{jk} 的概率之和为 1, 可以得到 $\sum_{j=1}^{\infty} p(Q_{jk}) = 1$ 。当时隙个数 n 趋于无穷时,所有随机事件发生的可能概率总和接近 1,可用式(13)表示:

$$\sum_{j=1}^n p(Q_{jk}) \approx 1 \quad (13)$$

其中, Q_{jk} 是输入比特 1 时释放分子事件中的随机变量,则 $E(Q_{jk})$ 是 Q_{jk} 的均值, $D(Q_{jk})$ 是 Q_{jk} 的方差,由公式 $E(Q_{jk}^2) = E(Q_{jk})^2 + D(Q_{jk})$ 可得:

$$\sum_{j=1}^n p(Q_{jk}) Q_{jk}^2 = \mu_{Q_k}^2 + \sigma_{Q_k}^2 \quad (14)$$

令 $F(k, n)$ 表示 T_{x_k} 在当前 n 个时隙输入比特 1 时,概率为 p_k 事件的方差。根据统计学,采用平均离均差平方和表示方差,则 $F(k, n)$ 的表达式如式(15)所示:

$$F(k, n) = (1 - p_k) \sum_{j=1}^n (0 - \mu_{Q_k} p_k)^2 a_j^2(r_k) + p_k \sum_{j=1}^n p(Q_{jk}) (Q_{jk} - \mu_{Q_k} p_k)^2 a_j^2(r_k) \quad (15)$$

根据式(13)和式(14),将式(15)化简如下:

$$\begin{aligned} F(k, n) &= (1 - p_k) \sum_{j=1}^n (0 - \mu_{Q_k} p_k)^2 a_j^2(r_k) + \sum_{j=1}^n p_k p(Q_{jk}) \\ &\quad (Q_{jk} - \mu_{Q_k} p_k)^2 a_j^2(r_k) \\ &= (1 - p_k) \sum_{j=1}^n (0 - \mu_{Q_k} p_k)^2 a_j^2(r_k) + p_k \sum_{j=1}^n p(Q_{jk}) \\ &\quad Q_{jk}^2 a_j^2(r_k) - 2p_k \sum_{j=1}^n p(Q_{jk}) Q_{jk} \mu_{Q_k} p_k a_j^2(r_k) + \\ &\quad p_k \sum_{j=1}^n p(Q_{jk}) \mu_{Q_k}^2 p_k^2 a_j^2(r_k) \\ &\approx (1 - p_k) \sum_{j=1}^n (\mu_{Q_k} p_k)^2 a_j^2(r_k) + (\mu_{Q_k}^2 + \sigma_{Q_k}^2) \sum_{j=1}^n p_k a_j^2 \\ &\quad (r_k) - 2\mu_{Q_k}^2 \sum_{j=1}^n p_k^2 a_j^2(r_k) + \mu_{Q_k}^2 \sum_{j=1}^n p_k^3 a_j^2(r_k) \\ &= (\mu_{Q_k}^2 + \sigma_{Q_k}^2) \sum_{j=1}^n p_k a_j^2(r_k) - \mu_{Q_k}^2 \sum_{j=1}^n p_k^2 a_j^2(r_k) \quad (16) \end{aligned}$$

由于多用户之间释放分子的概率是独立同分布的,所有用户释放分子事件的方差和即为 σ_1^2 ,表示如下:

$$\sigma_1^2 = \sum_{k=1}^M F(k, n) \quad (17)$$

根据式(17), σ_1^2 与第 n 个时隙 T_{x_k} 释放分子事件的方差之差即为 σ_0^2 ,表示如下:

$$\sigma_0^2 = \sigma_1^2 - a_0^2(r_k) \sigma_{Q_k}^2 \quad (18)$$

本文采用最小误差概率准则^[22]解决建立的假设检验模

$$Z_j = \frac{\mu_0 \sigma_1^2 - \mu_1 \sigma_0^2 + \sqrt{(\mu_0 \sigma_1^2 - \mu_1 \sigma_0^2)^2 - (\sigma_1^2 - \sigma_0^2)(\mu_0^2 \sigma_1^2 - \mu_1^2 \sigma_0^2 - 2\sigma_1^2 \sigma_0^2 (\ln \theta - \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_1})}}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} \equiv \eta \quad (22)$$

其中, $\mu_0, \mu_1, \sigma_0^2, \sigma_1^2$ 这4个参数可以通过式(12)、式(17)和式(18)求得。求得 Z_j 之后,即可得到 P_{F_k} 和 P_{D_k} 的值。通过式(22),可以得到误报率 P_{F_k} 和检测率 P_{D_k} :

$$\begin{aligned} P_{F_k} &= \int_{\eta}^{+\infty} f_{Z_j}^0(Z_j) d(Z_j) = Q\left(\frac{\eta - \mu_0}{\sigma_0}\right) \\ P_{D_k} &= \int_{\eta}^{+\infty} f_{Z_j}^1(Z_j) d(Z_j) = Q\left(\frac{\eta - \mu_1}{\sigma_1}\right) \end{aligned} \quad (23)$$

其中, $Q(x)$ 函数是标准正态分布的互补累计分布函数,定义如下:

$$Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \quad (24)$$

根据信息论中对信道容量的定义,信道容量是互信息熵的最大值,其计算公式^[23]如下:

$$\begin{aligned} C &= \max I(X_k; Y) \\ &= \max \sum_{x_k=0}^1 \sum_{y=0}^1 P(Y|X_k) P(X_k) \log \frac{P(Y|X_k)}{P(Y)} \end{aligned} \quad (25)$$

其中, $I(X_k; Y)$ 表示输入 X_k 和输出 Y 的互信息。

4 数值结果

本节将通过 MATLAB 仿真展示基于用户间干扰的分子通信模型中信道容量和误码率性能的情况。为了简化模型,定义 $T_{x_k} (1 \leq k \leq M)$ 之间的距离为 h , T_{x_1} 与 R_x 之间的距离为 d ,则 $r_k = \sqrt{d^2 + (k-1)^2 h^2}$ 。从仿真结果可以看出,不同参数,包括时隙个数 n 、 T_{x_1} 和 R_x 之间的距离 d 、扩散系数 D 、

型的优化问题。设 $P(H_0)$ 和 $P(H_1)$ 分别是 H_0 和 H_1 为真的先验概率,根据二元假设检验, $P(H_0) + P(H_1) = 1$ 。定义 P_e 为分子通信模型的误码率,其包含两个部分:1)事件是 H_0 而结果判断为 H_1 为真(误报率);2)事件是 H_1 而结果判断为 H_0 为真(漏检率)。误码率可以式(19)给出:

$$\begin{aligned} p_e &= P(H_1) P_{F_k} + P(H_0) (1 - P_{D_k}) \\ &= p_k (1 - P_{D_k}) + (1 - p_k) P_{F_k} \end{aligned} \quad (19)$$

为了得到较高的信道容量,应使 P_e 的值尽量小。根据式(19),判决准则为:

$$P(H_0) p(Z_j | H_0) - P(H_1) p(Z_j | H_1) \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

式(20)的解释如下:当左侧的值大于或等于0时,判断 H_0 为真;反之,判断 H_1 为真。其中, $P(H_1) = p_k$ 表示当前时隙 T_{x_k} 输入比特1的概率, $P(H_0) = 1 - p_k$ 表示当前时隙 T_{x_k} 输入比特0的概率。 $p(Z_j | H_0)$ 和 $p(Z_j | H_1)$ 分别表示当前时隙 T_{x_k} 输入比特0和1的情况下, R_x 处浓度为 Z_j 的概率密度函数。

式(20)可以写成以下形式:

$$L(Z_j) = \frac{p(Z_j | H_1)}{p(Z_j | H_0)} = \frac{P(H_0)}{P(H_1)} = \theta = \frac{1 - p_k}{p_k} \quad (21)$$

其中, θ 为似然比阈值^[21]; $L(Z_j)$ 称为判决函数,即两个条件的概率密度之比。式(21)即为最小误差概率判决准则。

通过式(21)可以得到 R_x 处浓度 Z_j 的解:

每个时隙持续时间 T_s 、 $T_{x_k} (1 \leq k \leq M)$ 间距 h 和用户数 M 对该分子通信模型的信道容量和误码率有重要的影响。考虑 T_{x_1} 和 R_x 的信息传输情况,假设 T_{x_1} 输入信号1的概率为 p_1 。默认参数设置如下: $n = 20$, $d = 20 \mu\text{m}$, $h = 50 \mu\text{m}$, $D = 100 \mu\text{m}^2/\text{s}$, $T_s = 10 \text{s}$, $M = 2$, $p_k = 0.5 (1 \leq k \leq M, k \neq 1)$, $\mu_{Q_k} = 1 \text{mol}$, $\sigma_{Q_k}^2 = 0.3 \mu\text{Q}_k$ 。

4.1 信道容量分析

图4描述了互信息随着时隙个数 n 的变化情况。设置 $p_1 = 0.5$ 。当 n 增大时,互信息的值变小。当 n 大于20之后,互信息在 ISI 和 IUI 干扰下变化不明显。当 n 分别取1, 10, 20, 30时,互信息分别为0.969, 0.892, 0.890, 0.890。结合图4可知,当 n 趋于无穷大时,互信息的值稳定在0.890。因此,本文设置时隙个数 n 为20。

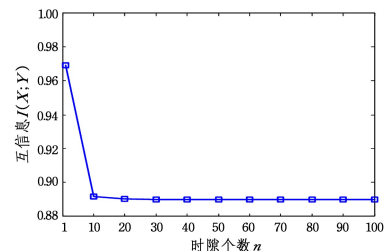


图4 互信息 $I(X;Y)$ 与时隙个数 n 的关系

Fig. 4 Relationship between mutual information $I(X;Y)$ and number of timeslots

图5描述了互信息在 d 取不同值的情况下随着先验概率

p_1 增大的关系。设置 d 分别取值为 $10\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ 。可以看出,对于每个 d 的取值,互信息随着先验概率 p_1 的曲线呈现非线性变化趋势。互信息的值一开始随着先验概率 p_1 的增加而增加,当到达某个特定峰值后开始减小。当 p_1 一定时,若增大 d 值,互信息的值会随之减少。由于 d 的增大导致分子击中发送方纳米机器的概率降低,因此,如果要保证互信息保持较高值,发送方纳米机器和接收方纳米机器的距离应尽可能接近。

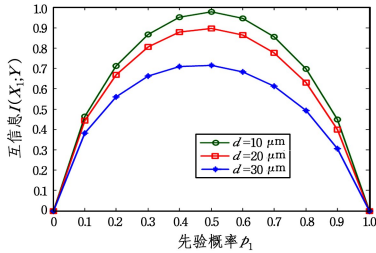


图5 d 取不同值的情况下互信息与 p_1 的关系

Fig. 5 Relationship between mutual information and p_1 for different values of d

图6展示了以自变量为先验概率 p_1 , 因变量即互信息 $I(X_1; Y)$ 随扩散系数 D 的变化情况。 D 分别取 $10\ \mu\text{m}^2/\text{s}$, $50\ \mu\text{m}^2/\text{s}$, $100\ \mu\text{m}^2/\text{s}$ 。由图6可知, $I(X_1; Y)$ 是 p_1 的凸函数,即在保持其他因素不变的情况下可以得到系统达到最大互信息所对应的 p_1 值。当 $p_1 = 0.5$ 时,互信息达到最大值。当生物环境的扩散系数 D 越大,分子之间的扩散会越快,则 Rx 接收分子的概率增大,因此,互信息的值也随之增加,当 $D = 100\ \mu\text{m}^2/\text{s}$ 时,互信息达到 $0.8827\ \text{bit/s}$ 。但是当互信息的值增大到某个特定的峰值之后,生物环境中的分子数增多,分子间的干扰明显增强,从而导致分子的扩散变慢,因此,互信息的值会逐渐减小。

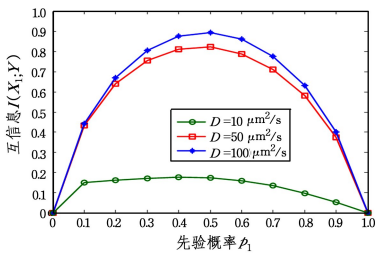


图6 D 取不同值的情况下互信息与 p_1 的关系

Fig. 6 Relationship between mutual information and p_1 for different values of D

图7描述了不同时隙持续时间下互信息随着 p_1 的变化曲线。 T_s 分别取 $1\ \text{s}$, $5\ \text{s}$, $10\ \text{s}$ 。

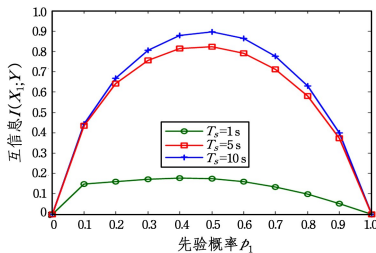


图7 T_s 取不同值的情况下互信息与 p_1 的关系

Fig. 7 Relationship between mutual information and p_1 for different values of T_s

对比不同的曲线可以看出,互信息会随着 T_s 的增加而增加。这是因为 T_s 的增加将导致生物环境中的分子增多,意味着 Rx 有更大的概率接收分子,互信息的值也随之变大。由实验仿真可知,当 T_s 增大到 $10\ \text{s}$ 时,互信息达到峰值。

图8展示了 h 取不同值的情况下互信息随着 p_1 的变化曲线。设置 $n=2$, h 分别取 $20\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 。对比不同的曲线可以看出,互信息随着 h 的增加而增加。这是因为 r_k 随 h 的增加单调递增,从而导致 T_{x_k} ($2 \leq k \leq M$) 释放的分子到达 Rx 的概率随着距离 r_k 的增加而降低,这意味着 Rx 受到的用户间干扰减小,互信息的值也随之变大。

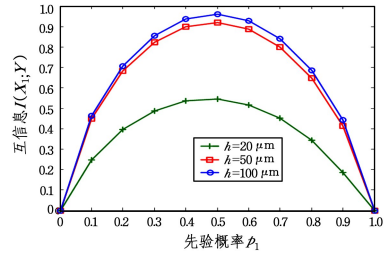


图8 h 取不同值的情况下互信息与 p_1 的关系

Fig. 8 Relationship between mutual information and p_1 for different values of h

下面分析 M 取不同值时互信息的变化情况。图9描述了 M 取不同值的情况下互信息随着 p_1 的变化曲线。由图9可知,当 M 值增加时,互信息会相应减小,这意味着接收方纳米机器受到的干扰增加。另外,对比曲线可以看到互信息会随着 M 值的增大迅速减小,说明 IUI 对多用户分子通信的信道容量有显著的影响。

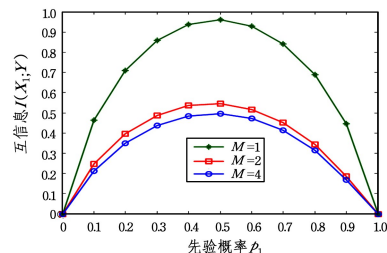


图9 M 取不同值的情况下互信息与 p_1 的关系

Fig. 9 Relationship between mutual information and p_1 for different values of M

4.2 误码率分析

图10描述以自变量为每个时隙持续时间 T_s , 因变量为误码率的曲线随用户数 M 的变化情况。

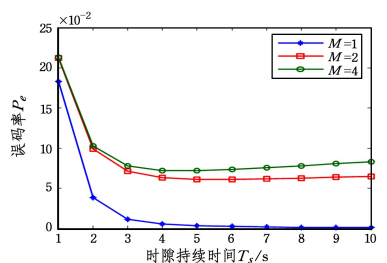


图10 在 M 取不同值的情况下,误码率 P_e 与时隙持续时间 T_s 的关系

Fig. 10 Relationship between error rate P_e and the slot duration T_s for different values of M

当 $M=1$, 即不存在 IUI 干扰时, 误码率随着 T_s 的增大明显降低; 当 $M=2, 4$ 时, T_s 在 3 s 后对误码率的影响不大。如果要使信道容量保持较高的水平, 应该尽量降低 IUI 对信道的影响。

结束语 由于分子通信的信道容量容易受到信道干扰的影响, 本文考虑基于浓度的分子扩散模型, 分析了码间干扰和用户间干扰, 使用 OOK 调制机制, 通过最小平均错误概率准则得到了接收方纳米机器检测过程中的最优判决阈值, 从而优化了信道容量和误码率。最后使用 MATLAB 仿真展示了不同的参数对 DBMC 模型的信道容量和误码率性能的影响。实验结果表明, 不同的参数, 包括时隙个数 n 、 T_{x_i} 和 R_x 之间的距离 d 、扩散系数 D 、每个时隙持续时间 T_s 、 T_{x_i} ($1 \leq i \leq M$) 间距 h 以及用户数 M 对信道容量和误码率会产生重要影响。此外, 先验概率 p_1 的取值也非常重要, 当 p_1 取值为 0.5 左右时, 信道容量可达到峰值。此外, 当用户间干扰增加时, 误码率会明显增加, 信道容量也会相应降低。

在实际的基于生物启发的分子通信系统中, 传输介质中会存在其他类型的噪声源干扰。因此, 在后续工作中, 应当考虑传输介质中的噪声干扰对分子通信模型信道容量的影响, 这也是我们未来的工作方向。

参考文献

- [1] SAINI R, SAINI S, SHARMA S. Nanotechnology: The future medicine[J]. Journal of Cutaneous & Aesthetic Surgery, 2010, 3(1): 32-33.
- [2] YEH P C, CHEN K C, LEE Y C, et al. A new frontier of wireless communication theory: diffusion-based molecular communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(5): 28-35.
- [3] ISLAM M S, VJ L. Nanoscale materials and devices for future communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(6): 112-120.
- [4] PIEROBON M, AKYILDIZ I F. Fundamentals of diffusion-based molecular communication in nanonetworks[J]. Foundations & Trends in Communications & Information Theory, 2013, 8(1-2): 1-147.
- [5] LI Z P, ZHANG J, CAI S B, et al. Review on molecular communication[J]. Journal of Communications, 2013, 34(5): 152-167. (in Chinese)
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.
- [6] NAKANO T, MOORE M, ENOMOTO A, et al. Molecular communication technology as a biological ICT[M]. Berlin: Biological Functions for Information and Communication Technologies, 2011: 49-86.
- [7] WANG J X, YIN B, PENG M G. Diffusion based molecular communication: principle, key technologies, and challenges[J]. China Communications, 2017, 14(2): 1-18.
- [8] NAKANO T, MOORE M J, WEI F, et al. Molecular communication and networking: opportunities and challenges[J]. IEEE Transactions on Nanobioscience, 2012, 11(2): 135-148.
- [9] FARSAFAD N, YILMAZ H B, ECKFORD A, et al. A comprehensive survey of recent advancements in molecular communication [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 18(3): 1887-1919.
- [10] PIEROBON M, AKYILDIZ I F. Intersymbol and co-channel interference in diffusion-based molecular communication [C] // IEEE International Conference on Communications. Ottawa: IEEE Press, 2012: 6126-6131.
- [11] NAKANO T, OKAIE Y, LIU J Q. Channel model and capacity analysis of molecular communication with brownian motion[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(6): 797-800.
- [12] HSIEH Y P, SHIH P J, LEE Y C, et al. An asynchronous communication scheme for molecular communication[C] // IEEE International Conference on Communications. Ottawa: IEEE Press, 2012: 6177-6182.
- [13] LIU Q, YANG K. Channel capacity analysis of a diffusion-based molecular communication system with ligand receptors [M]. Hoboken: John Wiley and Sons Ltd, 2015: 1508-1520.
- [14] PIEROBON M, AKYILDIZ I F. Capacity of a diffusion-based molecular communication system with channel memory and molecular noise [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(2): 942-954.
- [15] MUSTAM S M, SYED-YUSOF S K, ZUBAIR S. Capacity and delay spread in multilayer diffusion-based molecular communication channel [J]. IEEE Transactions on Nanobioscience, 2016, 15(7): 599-612.
- [16] MENG L S, YEH P C, CHEN K C, et al. Optimal detection for diffusion-based communications in the presence of ISI [C] // Global Communications Conference. Anaheim: IEEE Press, 2012: 3819-3824.
- [17] AWAN H, CHOU C T. Improving the capacity of molecular communication using enzymatic reaction cycles [J]. IEEE Transactions on Nanobioscience, 2017, 16(8): 744-754.
- [18] BICEN A O, LEHTOMAKI J J, AKYILDIZ I F. Shannon meets Fick on the microfluidic channel: diffusion limit to sum broadcast capacity for molecular communication [J]. IEEE Transactions on Nanobioscience, 2018, 17(1): 88-94.
- [19] MENG L S, YEH P C, CHEN K C. MIMO communications based on molecular diffusion [C] // Anaheim: Global Communications Conference, 2013: 5380-5385.
- [20] JIANG C, CHEN Y, LIU K J R. Inter-user interference in molecular communication networks [C] // IEEE International Conference on Acoustics. Florence: IEEE Press, 2014: 5725-5729.
- [21] MENG L S, YEH P C, CHEN K C, et al. A diffusion-based binary digital communication system [C] // IEEE International Conference on Communications. Ottawa: IEEE Press, 2012: 4985-4989.
- [22] KEENER R W. Probability and measure [J]. Journal of the American Statistical Association, 2012, 91(433): 1-24.
- [23] KABIRM H, KWAK K S. Molecular nanonetwork channel model [J]. Electronics Letters, 2013, 49(20): 1285-1287.