



面向 6G 的共生散射通信技术: 原理、方法与应用

张倩倩^{1,2}, 王俊^{1,2}, 梁应敞^{1*}

1. 电子科技大学智能通信与网络研究中心, 成都 611731

2. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731

* 通信作者. E-mail: ycliang@uestc.edu.cn

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-06-02; 接受日期: 2022-06-10; 网络出版日期: 2022-08-05

国家自然科学基金 (批准号: U1801261, 61631005)、国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB1801105) 和高等学校学科创新引智计划 (批准号: B20064) 资助项目

摘要 近年来, 共生散射通信因其在频谱与能量域的互惠共享特性而受到广泛关注, 为解决 6G 面临的频谱与能耗问题提供了潜在方案. 在该技术中, 次系统利用主系统的频谱及射频信号实现被动式反向散射通信, 而次系统的传输为主系统提供额外的多径效应, 有望提升主系统的性能. 本文首先介绍共生散射通信的基本概念及技术原理, 然后从信息论基础、接收机设计、资源配置, 以及多用户接入 4 个方面综述该技术的研究现状. 在此基础上, 讲述可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 在共生散射通信系统中的应用, 分析并总结了引入 RIS 为共生散射通信带来的性能增益. 最后介绍了融合共生散射通信的 6G 架构及应用前景, 并探讨了共生散射通信面临的技术挑战.

关键词 6G, 共生散射通信, 可重构智能表面, 互惠共生, 频谱效率, 能量效率

1 引言

伴随着 5G 的商用化进程, 各国已争相启动 6G 研究. 根据 6G 愿景^[1~3], 6G 时代将涌现更多的新型业务与应用场景, 包括: 全息通信、感官互联、被动式物联网、通感一体, 以及全域覆盖等, 这将促使无线数据流量及终端数目呈现爆炸性增长. 爱立信移动市场报告^[4]显示, 到 2027 年, 全球移动网络总流量将达 370 EB/月, 物联网连接数将超 302 亿. 如此海量的数据传输及终端接入将为 6G 网络设计带来巨大的挑战. 首先, 6G 需要更多的频谱资源来满足无线流量及终端接入增长的需求, 然而, 最适于无线通信的低中频段已几乎分配殆尽, 频谱资源短缺正制约着未来移动通信的发展. 其次, 信息与通信行业已占全球碳排放的 2%~4%^[5], 无线流量和终端接入数的持续增长将使 6G 面临更加严峻的能耗问题, 这不仅影响国家“双碳”目标的实现, 也冲击了通信行业的运营成本^[1]. 最后, 目前 5G 的三大应用场景需部署三类相对独立的基础设施来支撑, 这为运营商带来了巨大的基建负担^[6], 而 6G

引用格式: 张倩倩, 王俊, 梁应敞. 面向 6G 的共生散射通信技术: 原理、方法与应用. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 1393–1416, doi: 10.1360/SSI-2022-0153
Zhang Q Q, Wang J, Liang Y-C. Symbiotic backscatter communications for 6G: principles, approaches, and applications (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 1393–1416, doi: 10.1360/SSI-2022-0153

网络将支撑更多样化的应用场景, 这势必进一步加大运营商的负担. 因此, 如何在有限的频谱、能量, 以及基础设施资源下实现 6G 愿景正成为未来移动通信发展的关键.

传统上, 认知无线电是一种有效提升频谱资源利用效率的技术^[7]. 该技术允许次系统通过动态频谱接入或基于干扰控制的频谱共享方法使用主系统的授权频谱, 进而实现频谱资源利用效率的提升. 然而, 在该技术中, 次系统对主系统造成的不可避免的干扰阻碍了这一技术的广泛应用. 另一方面, 环境反向散射通信是一种能够有效降低设备传输能耗并共享通信基础设施的技术^[8]. 该技术的发送机是一个被动式反射通信单元, 无需配备振荡器及功率放大器等有源器件. 该反射通信单元通过调整负载阻抗来反射环境中的射频信号 (比如: WiFi 信号或蜂窝信号等), 进而实现信息传输. 然而, 由于环境射频信号的未知性与不可控性, 该技术检测性能受限, 难以实现高可靠的反向散射通信.

近年来, 共生散射通信因其在频谱和能量域的互惠共享特性^[9,10] 而受到了学术界与产业界的广泛关注, 并被相关学者列为 6G 的关键候选技术之一^[3,11~14]. 该技术包含两类系统: 主系统和次系统, 其中, 主系统是一个包含主动式发送单元的传统通信系统, 而次系统利用主系统的射频信号实现低功耗反向散射传输, 进而共享主系统的频谱、能量, 以及基础设施资源. 在次系统获得低能耗传输机会的同时, 主系统由于接收到来自次系统的多径分量, 其性能也有望得到提升^[15,16]. 与传统的认知无线电技术相比, 共生散射通信中主次系统有望形成互惠关系, 而非干扰关系, 因而可大幅提升系统的频谱资源利用效率. 同时, 不同于环境反向散射通信, 共生散射通信中的主次系统互相合作, 其接收机可采用联合检测以同时恢复主次系统发送的符号, 进而实现高可靠的反向散射传输. 共生散射通信系统中主次系统从彼此资源交互中获益的特性与生物界中根瘤菌与豆科植物形成的互惠共生现象类似, 因此, 无线通信中也存在着共生效应, 而主次系统共同受益的关系被定义为互惠共生关系^[10].

另一方面, 可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 因其对电磁环境的可控性而在近年来获得了广泛研究. RIS 是一种由大量低成本、亚波长结构且独立可控的反射单元构成的人造超材料^[17~20], 每个反射单元均能以不同的反射系数反射信号, 进而改变入射信号的相位、幅度或者频率等, 实现电磁波的可控传播. 将 RIS 引入至共生散射通信可以达到双重效果, 一是替代传统的反射通信单元来传输次系统信息, 二是利用其对电磁环境的可控性来辅助主系统信息传输, 从而进一步提升共生散射通信中主次系统的互惠增益.

本文对共生散射通信技术进行全面介绍, 首先概述其涉及的基础知识, 然后从信息论基础、接收机设计、资源配置与多用户接入 4 个方面阐述其研究现状, 之后讲述基于 RIS 的共生散射通信技术, 最后对共生散射通信在 6G 中的应用以及所面对的技术挑战进行探讨.

2 共生散射通信技术基础

在共生散射通信中, 次系统采用反向散射技术传输信息, 其和现在广泛研究的主动式通信技术有着极大的区别. 本节重点从天线散射原理、空中调制技术、共生通信系统模型, 以及路径损耗模型 4 个方面来讲述共生散射通信的基本概念与技术原理.

2.1 天线散射原理

在共生散射通信中, 次系统依据天线散射原理进行反向散射传输. 具体地, 根据天线散射理论^[21], 次系统发送机 (secondary transmitter, STx) 有两种散射模式: 结构散射和天线散射. 其中, 结构散射与 STx 天线的大小、形状及材料等有关, 它是无线信道中的一部分固有多径^[22]; 天线散射由天线阻

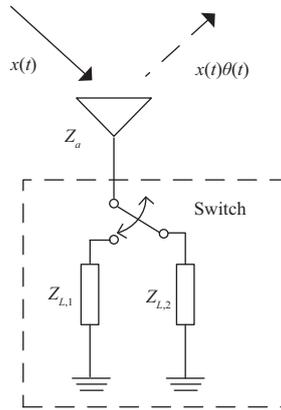


图 1 两种调制状态的空中调制: 发送比特“0”时采用负载阻抗 $Z_{L,1}$, 反射系数为 θ_1 ; 发送比特“1”时采用负载阻抗 $Z_{L,2}$, 反射系数为 θ_2

Figure 1 Modulation in the air with two modulated states. For bit “0”, load impedance $Z_{L,1}$ is switched on and the corresponding reflection coefficient is θ_1 . For bit “1”, load impedance $Z_{L,2}$ is switched on and the corresponding reflection coefficient is θ_2

抗与负载阻抗的不匹配而产生, 其形成的反射系数 θ 可表示为

$$\theta = \frac{Z_L - Z_A^*}{Z_L + Z_A} \tag{1}$$

其中, Z_L 表示 STx 的负载阻抗, Z_A 表示 STx 的天线阻抗. 由式 (1) 可知, 通过改变 STx 的负载阻抗可形成不同的反射系数. 例如, 当 STx 反射电路中的负载阻抗 Z_L 被设置为 Z_A^* 时, 此时的反射系数为零, 即不存在天线散射¹⁾; 当 STx 反射电路中的负载阻抗 Z_L 被设置为 $3\text{Re}(Z_A) - j\text{Im}(Z_A)$ 时, 此时的反射系数为 $\theta = 0.5$.

上述天线散射原理已在近年来拓展应用于设计可重构智能表面^[17~20]. 特别地, 可重构智能表面由人造超材料制成的大量反射单元构成, 其相位和幅度可调, 可实现电磁波的可控传播.

2.2 空中调制技术

与传统主动发送机需要自身生成载波信号不同, 共生散射通信中 STx 利用上述天线散射原理将其信息调制至来自于环境中的射频信号 $x(t)$ 上, 如图 1 所示, 因此该技术被称作空中调制技术^[23]. 在图 1 中, 反射电路部署多个负载阻抗, STx 根据其发送符号 $c(n)$ 周期性地切换至相应的负载阻抗, 进而形成时变的反射系数 $\theta(t)$ 及散射信号 $x(t)\theta(t)$.

将 $c(n)$ 的星座点个数记为 Q , 归一化的星座点集合记为 $\mathcal{A}_c = \{c_1, \dots, c_Q\}$, STx 发送符号周期记为 T_c . 发送符号序列 $c(0), c(1), \dots$ 与时变的反射系数 $\theta(t)$ 的映射关系可以表示为

$$\theta(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha c(n) g(t - nT_c), \tag{2}$$

其中, $\alpha \in (0, 1]$ 表示反射效率, $g(\cdot)$ 表示矩形窗函数.

1) 值得指出的是, 传统的主动式通信为了实现信号接收, 接收机的负载阻抗通常调整到与天线阻抗匹配的状态, 即 $Z_L = Z_A^*$.

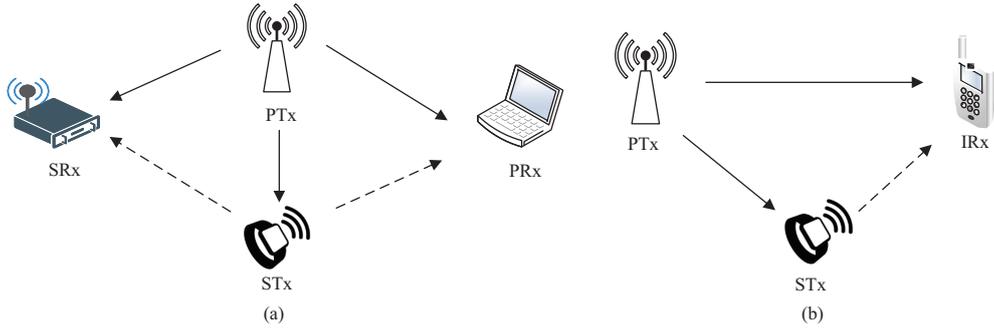


图 2 (网络版彩图) 共生散射通信系统模型

Figure 2 (Color online) System model for symbiotic backscatter communications. (a) Detached model; (b) integrated model

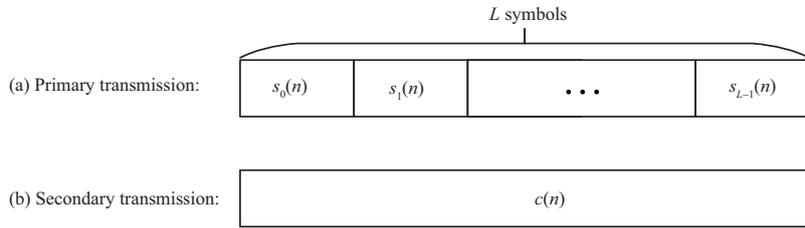


图 3 共生散射通信系统帧结构图

Figure 3 Frame structure for symbiotic backscatter communications

2.3 共生通信系统模型

共生散射通信的系统模型可以分为两类: 分离式模型和集成式模型, 如图 2 所示. 在分离式模型中, 主次系统分别有各自的接收机, 其中, 主系统发送机 (primary transmitter, PTx) 传输信息给主系统接收机 (primary receiver, PRx), STx 采用空中调制技术发送信息给次系统接收机 (secondary receiver, SRx). 在集成式模型中, 主次系统共享同一集成接收机 (integrated receiver, IRx), 该接收机需要同时恢复来自于 PTx 和 STx 的发送信号. 由于这两个模型对应的收发信号极为相似, 下文将就集成式共生散射通信系统进行描述.

将 PTx 的发送符号周期记为 T_s , 其星座点集合记为 \mathcal{A}_s . 如图 3 所示, 次系统发送符号周期设为 T_s 的 L 倍, 即 $T_c = LT_s$. 假定主次系统严格同步, 次系统的一个符号对应主系统的 L 个符号. 考虑次系统的第 n 个符号周期, 令 $s_l(n), l = 0, \dots, L - 1$ 表示主系统发送的第 l 个符号, 则 STx 收到的来自于主系统的信号为

$$x(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{p}h_1s_l(n)g(t - \tau_1 - lT_s)e^{j2\pi f_0(t-\tau_1)}, \quad (3)$$

其中, p 表示 PTx 的发送功率, h_1 和 τ_1 分别表示从 PTx 到 STx 的前向链路的信道和传输时延, f_0 表示主系统的载波频率.

令 h_0 表示从 PTx 到 IRx 的直接链路信道, h_2 表示从 STx 到 IRx 的后向链路信道. 假定从 PTx 到 IRx 的直接链路与从 PTx 到 STx 再到 IRx 的反射链路具有相同的时延, 则 IRx 接收到的基带信号 $y_l(n)$ 可表示为

$$y_l(n) = \sqrt{p}h_0s_l(n) + \sqrt{p}\alpha h_1h_2s_l(n)c(n) + u_l(n), \quad (4)$$

其中, $u_l(n) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 表示加性高斯 (Gauss) 白噪声. 式 (4) 中的第 1 项表示来自于直接链路的接收信号, 第 2 项表示来自于反射链路的接收信号. 由于反射链路接收信号中 $c(n)$ 与 $s_l(n)$ 的相乘关系, 上述信道被称为乘性多址信道, 是一种新型的无线接入信道. 此外, 主系统符号 $s_0(n), \dots, s_{L-1}(n)$ 可以看成为次系统符号 $c(n)$ 的扩频序列, 因此 L 也被称为扩频因子.

上述接收信号模型假设主次系统实现了完美同步. 为实现同步, 次系统传输共分为 3 个阶段, 分别为盲定时同步、训练报头传输, 以及信息传输. 在盲定时同步阶段, 反射设备切换至信息接收模式, 并利用互相关等方法估计得到发送机到反射设备的信道传播延时. 在训练报头传输阶段, 反射设备切换至反射模式, 并将所估计的信道传播延时作为起始时间发送接收端已知的训练报头, 接收机则根据所接收的直接链路信号与反射信号, 估计获得最小传播延时, 并进行同步补偿操作 [23].

2.4 路径损耗模型

由式 (4) 可知, IRx 的接收信号包含两部分, 一部分来自于直接链路, 另一部分来自于反射链路. 直接链路的路径损耗模型可表示为

$$P_d = \frac{pG_s G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 r_0^{v_0}}, \quad (5)$$

其中, P_d 表示 IRx 接收到来自于直接链路信号的平均功率, r_0 和 v_0 分别表示直接链路的距离以及路径损耗因子, G_s 和 G_r 分别表示 PTx 以及 SRx 的天线增益, λ 表示载波波长.

不同于直接链路, 反射链路包含前向链路和后向链路. 因此, 反射链路的路径损耗模型经历了双重衰落. 具体而言, IRx 接收到来自于反射链路信号的平均功率 P_b 可表示为

$$P_b = \alpha^2 p \times \frac{G_s G_l \lambda^2}{(4\pi)^2 r_1^{v_1}} \times \frac{G_r G_l \lambda^2}{(4\pi)^2 r_2^{v_2}}, \quad (6)$$

其中, r_1 和 r_2 分别表示前向链路以及后向链路的距离, v_1 和 v_2 分别表示前向链路以及后向链路的路径损耗因子, G_l 表示 STx 的天线增益.

由式 (5) 和 (6) 可知, 反射链路历经双重路径损耗, 相比于只历经单衰落的直接链路信号, 其在接收机的信号强度远小于直接链路.

3 共生散射通信信息论基础

从式 (4) 可以看出, 共生散射通信中存在一种新型的无线接入信道, 即乘性多址信道. 以下针对这一新型信道的信息论基础做介绍.

文献 [9] 研究了共生散射通信中主次系统的容量域表征, 并推导出主次系统可达速率的上下界. 当主系统符号 $s_l(n)$ 被完美解调时, 次系统可获得其可达速率上界. 当 $L = 1$ 时, 该上界可描述为

$$R_c = \mathbb{E}_{s_l(n)} \left[\log_2 \left(1 + \frac{p|\alpha h_1 h_2 s_l(n)|^2}{\sigma^2} \right) \right]. \quad (7)$$

当 L 取较大值时, 该上界可表示为

$$R_c = \frac{1}{L} \log_2 \left(1 + \frac{Lp|\alpha h_1 h_2|^2}{\sigma^2} \right). \quad (8)$$

对于主系统来说, 由式 (4) 可知, $s_l(n)$ 存在于直接链路与反射链路中, 在解码 $s_l(n)$ 时, 反射链路可以看作是一个慢变的多径信道, 为主系统传输带来多径效应, 此时 $s_l(n)$ 可达速率的上界可表示为

$$R_s \leq \mathbb{E}_{c(n)} \left[\log_2 \left(1 + \frac{p|h_0 + \alpha h_1 h_2 c(n)|^2}{\sigma^2} \right) \right]. \quad (9)$$

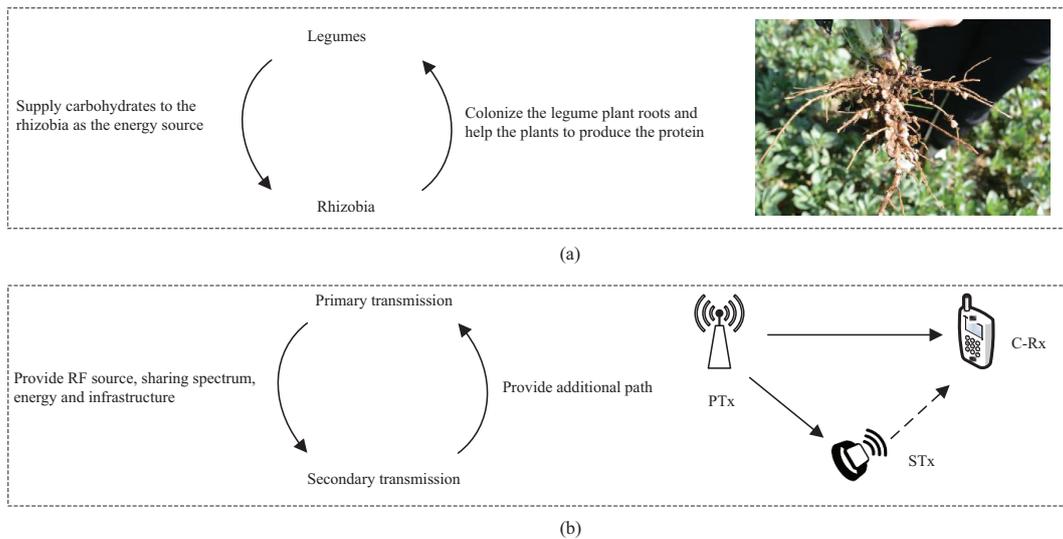


图 4 (网络版彩图) 生物与通信中共生关系类比

Figure 4 (Color online) Analogy of the symbiotic relationship between biology and communication. (a) Legume-rhizobium mutualism in biology; (b) primary and secondary transmission mutualism in communication

该上界在 $c(n)$ 可以被完美解调时可达. 此时, 主系统获得性能增益, 主次系统形成互惠共生关系. 当反射链路被当作干扰时, 主系统的可达速率将由以下下界来确定:

$$R_s \geq \log_2 \left(1 + \frac{p|h_0|^2}{p|\alpha h_1 h_2|^2 + \sigma^2} \right). \quad (10)$$

此时, 主系统性能受损, 主次系统形成寄生关系.

值得指出的是, 共生关系的概念最早源于生物界, 它是指多个生物体通过特定方式有机组合形成相互促进的关系. 生物界典型的互惠共生例子包括豆科植物与根瘤菌之间的共生, 其中, 豆科植物为根瘤菌提供其生存所必要的生物资源 (如: 碳水化合物、矿物质、水分等营养), 而根瘤菌则将大气中的氮转化为固态供给豆科植物, 进而促进其生长. 与这一共生例子类似, 在共生散射通信中, 次系统利用主系统的频谱、能量, 以及基础设施实现低功耗反射通信, 而次系统的传输为主系统提供额外多径, 使主系统性能得到提升^[10]. 图 4 针对上述两种共生关系进行了详细类比.

通过合理的系统参数设置, 共生散射通信中的主次系统可以互相受益, 有望实现互惠共生, 这也是共生散射通信技术和传统认知无线电技术的主要区别. 具体地, 在认知无线电中, 主系统具有较高的优先级来使用授权频谱, 而次系统采用交织式或底衬式频谱共享技术使用主系统的频谱. 在底衬式频谱共享中, 主次系统在同一频段上同时采用主动式传输技术发送信号, 使得两系统互相干扰, 而在交织式频谱共享中, 次系统的频谱利用依赖于精准的频谱感知技术, 当频谱感知不精准时, 次系统将为主系统传输带来严重的干扰. 因此, 在这两种频谱共享模式下, 主次系统均为互相干扰关系. 另一方面, 在协作式认知无线电技术中, 次系统为主系统提供中继服务来获取使用主系统的频谱资源的机会, 进而可实现主次系统的互惠传输. 但是在该技术中次系统采用主动式传输为主系统提供中继服务, 这将导致次系统用于传输自身信息的能量受限, 而共生散射通信中次系统因其反向散射特性为主系统提供性能增益, 不需要 STx 提供额外的能量, 因此共生散射通信具有更高的能量效率.

另一方面, 由于共生散射通信系统中相关信道 h_0, h_1, h_2 存在衰落特性, 研究共生散射通信系统中主次系统的遍历与中断速率显得尤为重要.

文献 [24] 研究了 $L = 1$ 下的主次系统中断概率和遍历速率, 结果表明, 在高信噪比区间, 次系统遍历速率曲线的斜率为 0.3. 文献 [25] 分析了 $L = 1$ 场景下次系统的最大互信息量及中断概率, 结果表明, 当 SRx 已知主系统调制方式时, 次系统信道容量将提升, 并且, PTx 采用相位调制时的次系统信道容量大于其采用高斯调制时的信道容量.

4 共生散射通信接收机设计

由式 (4) 可知, 反射链路中主次系统的发送符号呈现相乘关系, 因此共生散射通信与传统主动式通信在接收机设计方面有着较大区别. 针对共生散射通信中的乘性多址信道, 可以采取 3 种接收机设计方案来恢复次系统的发送符号: 联合检测接收机、半盲检测接收机, 以及全盲检测接收机.

4.1 联合检测接收机

针对集成式共生散射通信模型, IRx 已知主次系统的导频信息, 可以估计出直接链路信道和反射链路信道, 进而采用联合检测的方式同时恢复出主次系统的发送符号.

假设 PTx 和 STx 端以等概率发送各自的信号, 最大似然检测是最优的接收机, 其判决准则为 [26]

$$\{\hat{c}(n), \hat{s}_l(n), \forall l\} = \arg \min_{\substack{c(n) \in \mathcal{A}_c, \\ s_l(n) \in \mathcal{A}_s, \forall l}} \sum_{l=0}^{L-1} \|y_l(n) - \sqrt{p}h_0s_l(n) - \sqrt{p}\alpha h_1h_2s_l(n)c(n)\|^2, \quad (11)$$

其中, $\hat{c}(n)$ 和 $\hat{s}_l(n)$ 分别为 $c(n)$ 以及 $s_l(n)$ 的估计信号. 该接收机的计算复杂度可以通过以下步骤降低至 $L|\mathcal{A}_s||\mathcal{A}_c|$: 首先, 接收端采用最大比值合并 (maximum-ratio-combining, MRC) 方法恢复出给定 $c(n)$ 下的 $s_l(n)$, 得到 $\hat{s}_l(n)|_{c(n)}$; 然后, 将所有 $c(n)$ 对应的 $\hat{s}_l(n)|_{c(n)}$ 代入式 (11) 中, 最小均方差对应的 $c(n)$ 则为所估计的 $\hat{c}(n)$; 最后, $\hat{c}(n)$ 对应的 $\hat{s}_l(n)|_{\hat{c}(n)}$ 是所估计的 $\hat{s}_l(n)$.

文献 [26] 也研究了集成式模型下的线性接收检测接收机以及基于串行干扰消除的迭代检测接收机. 仿真结果表明, 当扩频因子较大且直接链路与反射链路的信号强度相同时, 相比于无次系统传输的场景, 主系统可通过最大似然检测获得 3 dB 的信噪比增益. 文献 [27, 28] 研究了多用户场景下的接收机设计方案, 其中 IRx 联合检测多个 PTx 和多个 STx 的信息. 特别地, 文献 [27] 设计了基于消息传递的接收机, 联合进行多用户信道估计以及主次系统的多用户检测; 文献 [28] 采用随机优化方法联合设计发送波束赋形向量及线性接收检测向量, 进而恢复主次系统发送符号.

4.2 半盲检测接收机

针对分离式共生散射通信模型, 当次系统仅知自身导频信息以及部分主系统信息时, SRx 可以采用半盲检测恢复 STx 的发送符号.

如图 5 所示, 接收信号自然相聚成簇, 这说明了信号检测方案可以转化为一个聚类问题. 当 SRx 已知主系统调制方式时, 文献 [29] 研究了基于接收信号星座点特性的聚类接收机. 具体地, 接收端首先利用高斯混合模型 (Gaussian mixed model, GMM) 对接收信号进行聚类, 然后利用一些标记符号将聚类类别与发送符号进行映射, 最后恢复出发送符号. 如图 5 所示, 由于发送星座点具有相关性, 接收信号形成的簇也具有相关性. 这说明接收信号形成的簇中心点可以使用少量参数进行参数化表示, 文献 [29] 利用星座点之间的相关性, 设计出一种新型的调制受限的期望最大化聚类接收机, 该接收机结合了机器学习与无线通信的特性与优势, 可逼近信道信息完美已知情况下的最优检测性能.

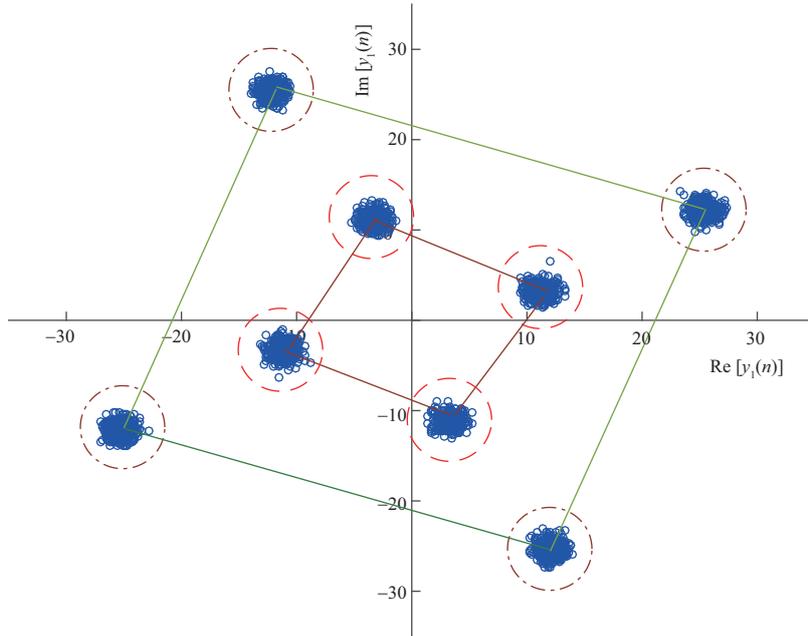


图 5 (网络版彩图) 接收信号星座点图, 其中 PTx 采用 QPSK 调制, STx 采用 BPSK 调制

Figure 5 (Color online) The constellation points of the received signals where PTx adopts QPSK modulation and STx adopts BPSK modulation

文献 [30] 研究了主系统采用相位偏移调制 (phase-shift keying, PSK) 调制场景下的接收机设计方案, 该方法首先估计信道的幅度和相位, 然后恢复次系统发送符号. 信道幅度采用采样均值方法来估计, 而主系统信号的等幅特性则用来估计信道相位. 仿真结果表明, 该检测方案可逼近信道信息完美已知情况下的最优检测性能. 针对 PTx 传输正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 信号的场景, 文献 [23] 提出了可消除直接链路干扰的接收机检测方案, 该方案利用 OFDM 的循环前缀特性, 设计出 STx 的发送波形, 其中, 当 STx 传输比特 “0” 时, 发送波形在一个符号周期内保持不变, 当 STx 传输比特 “1” 时, 发送波形在半个符号周期处发生反转. 接收端基于该发送波形方案, 设计出与直接链路信号无关的检测统计量, 避免了强直接链路造成的干扰, 大幅提升了 SRx 的检测性能.

4.3 全盲检测接收机

针对分离式共生散射通信模型, 当次系统仅知自身导频信息而对主系统信息完全未知时, SRx 可采用全盲检测接收机来恢复次系统发送的符号. 能量检测器是一种典型的全盲检测方案. 假设 STx 发送比特 “1” 时比发送比特 “0” 时 SRx 的接收信号更强, 能量检测器的判决准则为

$$\left| \sum_{l=0}^{L-1} y_l(n) \right|^2 \underset{\text{bit "0"}}{\overset{\text{bit "1"}}{\geq}} \epsilon, \quad (12)$$

其中, ϵ 表示判决门限.

文献 [8] 研究了基于能量检测的次系统符号恢复方案, 其中判决门限 ϵ 的取值是 SRx 接收信号的平均能量. 该文献采用差分编码方式发送次系统符号, 使 SRx 不必进行信道估计, 可以有效降低接收机的计算复杂度. 文献 [31] 分析了差分编码下能量检测的理论误码率性能, 推导出 ϵ 的最优取值, 并

分析了高信噪比条件下次系统误码率的上下界. 为了避免差分编码带来的误码率性能损失, 文献 [32] 研究了 STx 发送导频信息下的能量检测方案, 利用导频信息方式来获取判决门限 ϵ , 并分析了所设计接收机的理论误码率性能.

4.4 互惠共生条件

根据主次系统的受益关系, 共生散射通信将形成不同的共生关系, 比如寄生共生与互惠共生等. 其中, 扩频因子 L 的取值将直接影响主次系统的共生关系 [15,16]. 具体地, 由式 (4) 可知, 反射链路包含主系统的发送信号 $s_l(n)$, 当扩频因子 L 取值较大时, 对于主系统来说, 反射链路可以看作是一个慢变的多径信道, 为主系统传输带来多径效应. 扩频因子 L 取值越大, 反射链路中对主系统信号 $s_l(n)$ 的波形特征的改变越小, 主系统获得的多径增益越明显, 主次系统的互惠传输效果越好. 当扩频因子 L 取值较小时, 反射链路中 $c(n)$ 对主系统信号 $s_l(n)$ 的波形特征改变较大, 导致主系统的性能受损, 此时主次系统形成寄生关系.

针对扩频因子 L 影响主次系统共生关系的现象, 文献 [15,16] 研究了主次系统的互惠共生条件, 推导出互惠共生关系下扩频因子 L 需满足的表达式. 具体地, 次系统在主系统的帮助下无需额外的能量及频谱资源实现信息传输, 故它为受益的一方, 因此, 主次系统能否实现互惠共生的关键在于主系统能否获益. 将主系统的性能增益定义为 $\eta \triangleq P_{s,w} - P_s$, 其中 $P_{s,w} = Q(\frac{\sqrt{P} \|h_{00}\|}{\sigma})$ 表示次系统不存在时主系统的误码率性能. 当 $\eta \geq 0$ 时, 共生散射通信中的主系统可以获得更好的误码率性能, 故主次系统可以实现互惠共生. 文献 [16] 推导出任意 L 下主次系统的误码率表达式, 并求得当 $\eta \geq 0$ 时, 扩频因子 L 需满足的条件. 结果表明, 当 IRx 接收天线 M 取值很大时, 共生散射通信关于 L 的互惠共生条件为

$$L \geq \frac{\left(Q^{-1} \left(\frac{Q(\sqrt{M\gamma_d}) - Q(\sqrt{M\gamma_d(1+\Delta\gamma)})}{Q(\sqrt{\frac{M\gamma_d}{1+\Delta\gamma}(1-\Delta\gamma)}) - Q(\sqrt{M\gamma_d(1+\Delta\gamma)})} \right) \right)^2}{\varpi^2}, \quad (13)$$

其中, γ_d 表示直接链路平均信噪比, $\Delta\gamma = \frac{\gamma_b}{\gamma_d}$ 表示直接链路和反射链路之间的相对信噪比, 特别地, γ_b 表示反射链路平均信噪比, ϖ 是仅与 γ_d , $\Delta\gamma$, 以及接收天线数 M 相关的变量 [16], Q 函数是标准正态分布的互补累计分布函数, 即 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$. 当扩频因子 L 的取值满足上述条件 (13) 时, 主次系统可以实现互惠共生; 同时, 当 IRx 接收天线足够多时, 互惠共生条件仅与直接链路及反向散射链路的平均信噪比有关, 与瞬时信道状态信息无关.

4.5 仿真结果

图 6(a) 和 (b) 示出了当接收天线数为 $M = 1$ 且扩频因子为 $L = 16$ 时, 主次系统发送信号对应的误码率性能, 其中半盲检测采用文献 [29] 所提方法, 全盲检测利用式 (12) 所示的判决规则. 在该图中, 考虑到信道的相干时间 [33], 假定每一帧内包含 800 个传输次系统符号. 直接链路信道服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布, 噪声功率设为 $\sigma^2 = 1$, 通过调整发送功率 p 改变接收到的直接链路平均信噪比 γ_d . 反射系数取值设为 $\alpha = 1$, 反射链路信道服从均值为 0、方差为 σ_h^2 的复高斯分布, 通过改变 σ_h^2 的取值改变直接链路和反射链路之间的相对信噪比 $\Delta\gamma$. 由图 6(a) 可知, 相比于不存在次系统传输的场景, 主系统可以获得额外的性能增益. 当 $\Delta\gamma = 0$ dB 时, 主系统可获得 3 dB 的信噪比增益. 当 $\Delta\gamma = -10$ dB 时, 主系统获得的性能增益较少, 这是由于该场景下反射链路强度受限. 由图 6(b) 可知, 相比于最优的最大似然检测, 半盲检测有 1 dB 左右的性能损失, 全盲检测由于只用到了接收信号的能量信息, 其性能损失较大, 但是其计算复杂度较低, 易于实现.

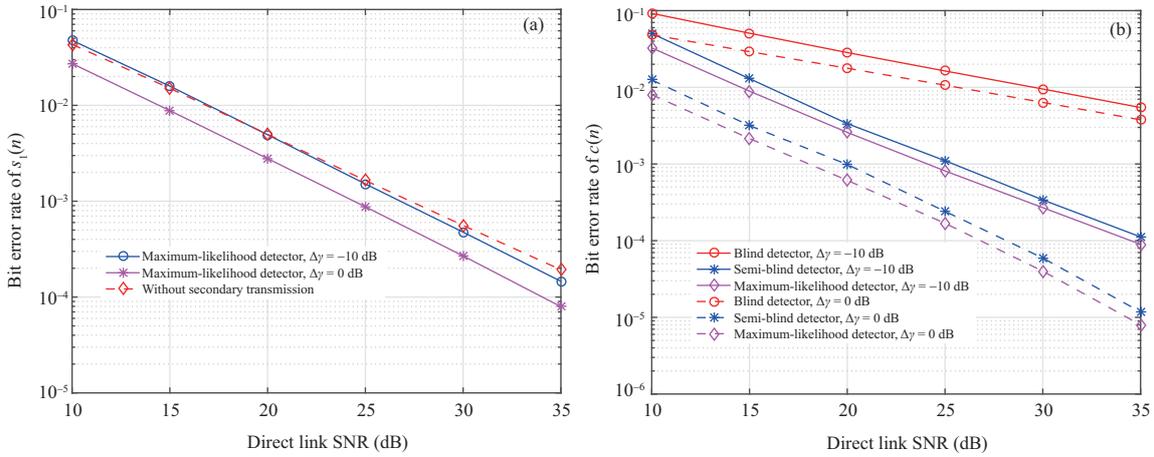


图 6 (网络版彩图) (a) 共生散射通信主系统误码率; (b) 共生散射通信次系统误码率

Figure 6 (Color online) Bit error rate of the primary transmission (a) and the secondary transmission (b) for symbiotic backscatter communications

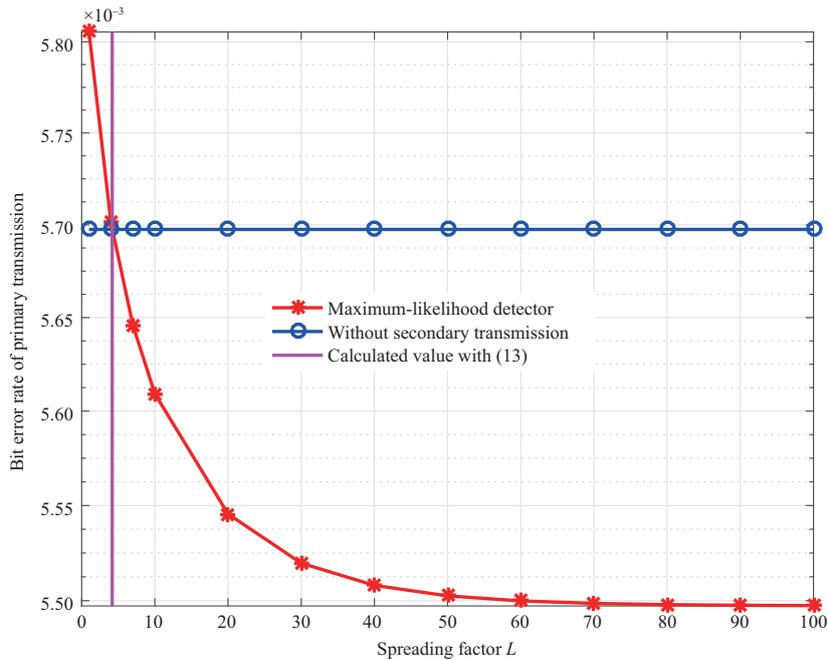


图 7 (网络版彩图) 主系统误码率曲线与扩频因子 L 的关系

Figure 7 (Color online) Bit error rate performance of the primary transmission versus the spreading factor L

图 7 示出了当 $M = 128$, $\gamma_d = -13$ dB, 以及 $\Delta\gamma = -20$ dB 时, 主系统误码率曲线与扩频因子 L 的关系. 在该图中, 假定直接链路信道中的每一个元素服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布, 反射链路信道中的每一个元素服从均值为 0、方差为 σ_h^2 的复高斯分布, 其余参数设置方法与图 6(a) 和 (b) 相同. 由此图可以看出, 在共生散射通信中, 主系统的误码率随着扩频因子 L 的增大而降低, 在该参数设置下, 当 $L \geq 5$ 时, 主系统的误码率低于不存在次系统传输的场景, 因此主系统能够获得次系统传

输所带来的性能增益, 主次系统形成互惠共生关系, 反之, 主次系统形成寄生关系. 同时, 图 7 也验证了式 (13) 的有效性.

5 共生散射通信资源配置

如前所述, 在共生散射通信系统中, 主次系统间共享频谱以及能量等多个通信资源, 并且在不同的参数设置下主次系统将形成不同的共生关系. 因此, 合理地配置通信资源对于实现不同共生关系下主次系统的性能提升至关重要. 以下对 PTx 配置单天线、多天线, 以及 STx 采取新型反射 3 个场景下的资源优化与配置问题进行详细介绍.

5.1 单天线场景

当 PTx 配置单天线时, 主次系统的性能指标要求可以通过设计主系统的发送功率与次系统的反射系数来满足. 常见的资源优化与配置问题包括加权和速率最大化以及次系统速率最大化等问题. 具体地, 加权和速率最大化问题可表示为

$$P_1 : \max_{p, \alpha} \quad \rho_1 R_s(p, \alpha) + \rho_2 R_c(p, \alpha)$$

$$\text{s.t.} \quad p \leq P_{\text{pk}} \text{ or } \mathbb{E}[p] \leq P_{\text{av}}, \quad (14\text{a})$$

$$0 \leq \alpha \leq 1, \quad (14\text{b})$$

其中, ρ_1 和 ρ_2 表示主系统速率与次系统速率的加权因子, P_{pk} 和 P_{av} 分别表示 PTx 的峰值和平均发送功率. 约束 (14a) 表示 PTx 的发送功率约束, 约束 (14b) 是由于 STx 是一个被动式反射通信设备. 基于这一优化问题模型, 文献 [34] 研究了不同共生关系下的主次系统遍历加权和速率最大化问题: 当主次系统形成互惠共生关系时, 反射系数被固定设置为最大值, 最优的功率分配由所提出的凸优化算法获得; 当主次系统形成寄生关系时, 所形成的优化问题非凸, 文章提出一种基于凹 - 凸过程的算法来迭代获得次优解.

文献 [35] 研究了不同的能量消耗模型、不同的发送功率约束、不同的反射系数设置与不同的主系统干扰需求下的次系统遍历速率最大化问题, 并提出了各个场景下的最佳功率分配与反射系数设置方案. 结果表明, 在平均发送功率约束下的系统性能往往优于峰值发送功率约束下的性能, 并且相比于主系统传输速率约束, 采用主系统传输中断概率约束能实现更高的次系统遍历速率. 同时, 文献 [36] 设计了平均发送功率约束下的最优功率分配方案, 研究了不同共生关系下的主/次系统平均可达速率最大化问题.

5.2 多天线场景

当 PTx 配置多天线时, 多天线带来的空间自由度可用来实现主次系统性能的折中. 多天线场景下的发送功率最小化问题模型可表示为

$$P_2 : \min_{\mathbf{v}, \alpha} \quad \|\mathbf{v}\|^2$$

$$\text{s.t.} \quad R_s(\mathbf{v}, \alpha) \geq \tilde{R}_s, \quad (15\text{a})$$

$$R_c(\mathbf{v}, \alpha) \geq \tilde{R}_c, \quad (15\text{b})$$

$$0 \leq \alpha \leq 1, \quad (15\text{c})$$

其中, \tilde{R}_s 和 \tilde{R}_c 分别表示主次系统要求的最小传输速率. 基于这一优化问题模型, 文献 [37] 运用半正定松弛技术来设计发送波束赋形向量. 同时, 该文献提出了一种新颖的波束赋形结构来降低计算复杂度, 其中, 发射波束赋形向量是直接链路信道向量和反向散射链路信道向量的线性组合, 进而通过设计线性组合系数来设计波束赋形向量. 仿真结果表明, 采用设计的波束赋形方案可使主次系统性能得到提升, 并且所提出的基于波束赋形结构的次优算法性能逼近于最优算法的性能.

文献 [38] 考虑次系统传输短包信息, 推导出短包场景下的主次系统可达速率, 研究了发送功率最小化以及能量效率最大化问题, 并提出了一种基于半正定松弛和连续凸逼近的算法来设计发送波束赋形向量. 文献 [39] 研究了 PTx 和 STx 均部署多天线的场景下的加权和速率最大化问题, 并提出一种基于精确惩罚的算法来设计 PTx 的波束赋形矩阵. 结果表明, 相比于最大比传输方案, 所提方案能显著提升次系统的传输速率. 文献 [40] 关注毫米波场景下的共生散射通信, 其中, PTx 与 STx 均配置多天线且扩频因子为 $L = 1$. 该文献通过联合设计 PTx 的模拟与数字域混合波束赋形以及 STx 的被动式波束赋形, 最大化次系统传输速率. 结果表明, 与只在 PTx 作混合波束赋形的方案相比, 所提出的联合波束赋形设计方案能显著提升次系统传输速率.

5.3 新型反射场景

近年来, 全双工及具有放大功能的反射单元已被应用于共生散射通信系统 [41, 42]. 文献 [41] 研究了具有信息接收能力的 STx, 它来自 PTx 的信号分为两部分: 一部分用于解调 PTx 信息, 另一部分用于反向散射传输自身信息. STx 用于解调 PTx 信息的接收信号以及 STx 反向散射的信号可分别表示为

$$y_{1,l}(n) = \sqrt{\beta} \sqrt{p} h_{1l} s_l(n) + u_{1,l}(n), \quad (16)$$

$$x_l(n) = \sqrt{1 - \beta} \sqrt{p} h_{1l} s_l(n) c(n), \quad (17)$$

其中, $u_{1,l}(n)$ 表示 STx 的接收噪声, β 表示 STx 的功率分配因子. 为了最小化发送功率, 该文献联合设计了 PTx 的波束赋形向量以及 STx 的功率分配系数. 仿真结果显示, 这种全双工设计方案的性能优于基于时分的双工系统.

文献 [42] 研究了具备放大功能的 STx, 它通过放大入射信号来增强反射链路强度. STx 反向散射的信号可表示为

$$x_l(n) = \sqrt{p_s} (\sqrt{p} h_{1l} s_l(n) c(n) + u_{1,l}(n)), \quad (18)$$

其中, p_s 表示 STx 通过调节不同的负阻抗实现的功率放大因子. 与传统的被动式反向散射不同, 这里的 STx 需要主动式电路来放大反向散射信号, 并且该过程引入的热噪声不可忽略. 该文献通过设计 PTx 的发送功率以及 STx 的放大系数, 在保证次系统及另一系统传输性能的条件下最大化主系统的可达速率.

6 共生散射通信多用户接入

共生散射通信网络存在多个主用户和次用户, 由于次用户传输依赖主用户的频谱、能量及基础设施, 如何将多个次用户与主用户关联是实现次用户传输的关键.

文献 [43] 研究了主次用户的关联方案以最大化次用户和速率. 其中, PTx 采用时分多址的方式服务多个 PRx 用户, 每个 STx 与一个 PRx 进行用户关联, 并在 PRx 所在的时隙传输信息. 若采用传统

表 1 共生散射通信多用户接入协议设计

Table 1 Multi-user access protocol design for symbiotic backscatter communications

References	Access protocol	Design objective	Results
[46]	TDMA	Maximize the energy efficiency	When STx with the potential highest throughput is allocated with the maximum allowed transmission time, the maximum energy efficiency can be achieved
[47, 48]	CDMA	Maximize the minimum SINR	Avoid the need for coordination among PTx and is proper for PTx with limited signal processing capability
[49]	SDMA	Maximize the achievable rate of primary transmission	The achievable rate of primary transmission can be enhanced by increasing the number of PTx
[50]	NOMA	Maximize the sum rate of secondary transmission	The system throughput can be enhanced with NOMA
[51]	NOMA+TDMA	Maximize the minimum throughput of secondary transmission	The hybrid access scheme can achieve a better throughput performance

的优化算法设计用户关联方案, 则需全局瞬时信道状态信息, 这将造成较大的系统负载. 针对此问题, 该文献采用深度强化学习算法利用历史信道状态信息学习用户之间的干扰模式^[44], 设计出无需全局瞬时信道状态信息的用户关联方案. 研究表明, 所设计的基于深度强化学习的用户关联方案可以逼近于全局信息已知下的最优方案. 文献 [45] 联合设计了反射系数与用户关联方案, 以最大化主次系统的加权和速率. 其中, 多个 PTx 在正交的时频资源上给其关联的 PRx 传输信息, 并且, 每个 STx 与一个 PTx 相互关联以进行信息传输. 该文献提出了两种接入控制策略: 离线策略和在线策略, 其中, 离线策略假设决策方已知所有的信道信息, 并采用凸函数近似及对偶分解的方式获取用户关联方案; 在线策略假设决策方未知信道信息, 并采用组合多臂机的算法设计用户关联方案. 研究表明, 离线策略和在线策略可以获得相当的性能, 并优于传统的启发式设计方案.

为了支撑多用户接入, 文献 [46~51] 设计了不同的接入协议, 总结如表 1 所示.

文献 [46] 提出了基于时分多址 (time division multiple access, TDMA) 的多个次用户接入方案, 通过设计主用户的发送功率、次用户的反射系数以及次用户的接入时长, 来最大化整个系统的能量效率. 结果表明, 当最可能达到最大吞吐量的次用户被分配最大允许的传输时间时, 可以实现系统能量效率最大.

文献 [47] 提出了基于码分多址 (code-division multiple access, CDMA) 的次用户接入方案, 其中每个次用户选择一个随机码, 并乘以其发送符号来传输信息. 该文献利用大维随机矩阵理论推导了 STx 的渐近信干噪比 (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR), 结果表明, 这一渐近 SINR 与次用户选取的特定的随机码以及反射链路的瞬时信道状态信息无关, 而仅与系统负载和统计信道状态信息有关. 该文献通过设计主用户的发送功率以及次用户的反射系数, 来最大化最小的 SINR. 这种接入方案无需次用户之间的协作, 适用于次用户收发能力受限的场景. 文献 [48] 利用 μ code 编码方式对 STx 的信息进行编码, 使得 STx 反射的信号相互正交而不构成干扰. 同时, 该编码方式不需要接收机处严格同步, 适用于多个 STx 同步或非同步传输. 但是, 当两个 STx 的接入时间间隔大于一个序列长度时, 这种接入方案的传输性能将不能得到保证.

文献 [49] 研究了基于空分多址 (spatial division multiple access, SDMA) 的多个次用户同频同时接

入问题. 该文献推导了主次系统的可达速率, 并根据该结果设计了接收波束赋形向量来最大化主系统可达速率. 结果表明, 主次系统的可达速率均随着次用户数目的增加而增加, 因此, 通过海量接入可以充分利用共生散射通信的互惠共生关系.

非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 技术支持多用户在同一正交资源上接入, 可有效提升频谱资源利用效率. 文献 [50] 提出了基于 NOMA 技术的多个次用户接入方案, 通过设计多个次用户的反射系数来最大化次用户的和速率. 结果表明, 相比于正交多址接入, 即使采用随机资源分配方案, NOMA 技术仍可有效提升系统的吞吐量. 文献 [51] 设计了基于 NOMA 和动态 TDMA 的混合接入方案, 其中次用户被分为多个簇, 每个簇根据 TDMA 协议在相应的时隙发送信息, 簇内的次用户采用 NOMA 协议传输信息. 该文献通过设计主用户的发送功率、次用户的反射系数, 以及接入时长, 来最大化次用户的最小吞吐量. 结果表明, 相比于传统接入方案, 所提出的混合接入方案能够获得更好的吞吐量性能.

7 基于 RIS 的共生散射通信技术

在共生散射通信中, 反射链路强度制约着主次系统的传输性能, 这是因为次系统信息加载在反射链路上, 且主系统的性能增益源于反射链路产生的多径效应. 同时, 同频信号干扰也是限制主次系统传输性能的主要因素, 这是因为传统的反射通信单元将反射同一载波频率上的所有信号, 该特性将使接收机接收到额外的干扰信号. 因此, 增强反射链路强度并且抑制同频信号干扰是实现共生散射通信传输性能提升的关键. RIS 因其被动式波束赋形功能可同时实现上述两个目标, 有效提升共生散射通信的传输性能.

RIS 是一种人造超材料, 可以实现自然材料不具备的物理特性 [17, 19, 20]. RIS 由大量低成本、亚波长结构且独立可控的反射单元构成, 每个反射单元均能以不同的反射系数反射信号, 进而改变入射信号的相位、幅度或者频率等, 实现电磁波的可控传播. 目前, RIS 因其对电磁环境的可控性被广泛地用于辅助各种无线通信系统以提升传输性能, 比如多用户传输 [52]、多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 通信 [53]、认知无线电 [54], 以及物理层安全 [55] 等系统.

不同于上述研究, 在基于 RIS 的共生散射通信中, RIS 具有双重功能: (1) 替代传统的反射通信单元来传输次系统信息; (2) 通过被动式波束赋形来辅助主系统信息传输. 通过设计 RIS 的反射系数, 来自不同 RIS 反射单元的信号在接收端相干叠加, 使得反射链路增强, 可以证明, 来自 RIS 反射链路的信号强度与 RIS 反射单元个数的平方成正比 [17]. 同时, RIS 具有波束选择的功能, 在复杂电磁环境下可以选择信号的入射方向和反射方向, 避免产生额外的干扰 [19]. 因此, RIS 可以有效增强反射链路并且抑制同频干扰, 也因此优势, 基于 RIS 的共生散射通信系统获得了广泛的关注和研究.

7.1 调制方案设计

RIS 既要辅助主系统通信又要传输次系统信息, 因此在基于 RIS 的共生散射通信系统中, RIS 的反射系数矩阵需要被设计来承载次系统符号. 记 $\Phi(t) = \text{diag}(\theta_1(t), \dots, \theta_K(t))$ 为 RIS 时变的反射系数矩阵, 其中 K 表示 RIS 的反射单元数, $\theta_k(t)$ 表示第 k 个反射单元的反射系数. 依照文献 [56] 给出的调制方案, 次系统发送符号 $c(n)$ 和反射系数矩阵 $\Phi(t)$ 的映射关系可表示为

$$\Phi(t) = \alpha \tilde{\Phi} c(n), \quad t \in (nT_c, (n+1)T_c], \quad (19)$$

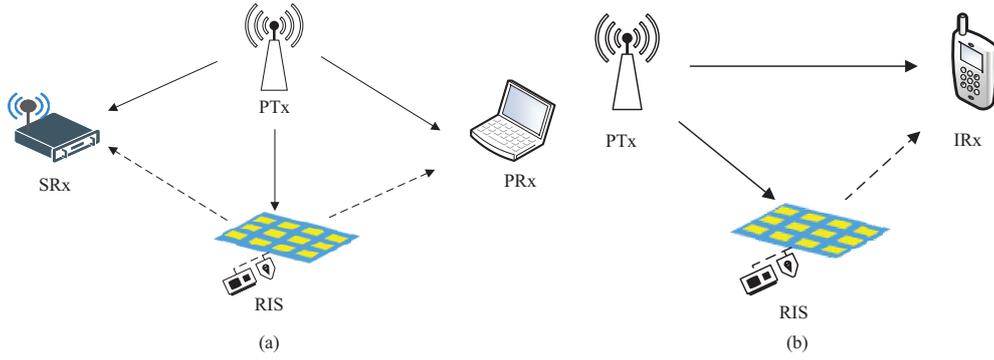


图 8 (网络版彩图) 基于 RIS 的共生散射通信系统模型

Figure 8 (Color online) System model for RIS-assisted symbiotic backscatter communications. (a) Detached model; (b) integrated model

其中, α 表示反射效率, $\tilde{\Phi}$ 表示被动式波束赋形矩阵. 此外, 文献 [57] 考虑 RIS 采用空间调制方式传输次系统信息, 其中, RIS 利用其被动式波束赋形功能形成到接收机某根天线的反射波束, 不同的接收天线索引表示不同的比特信息.

7.2 系统模型

如图 8 所示, 基于 RIS 的共生散射通信系统模型也可分为两类: 分离式模型和集成式模型²⁾. 本小节将以分离式 MIMO 场景为例讲述基于 RIS 的共生散射通信系统模型. 若 RIS 采用式 (19) 所示的调制方式, 则 PRx 接收信号 $\mathbf{y}_l(n)$ 可表示为

$$\mathbf{y}_l(n) = \mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{s}_l(n) + \alpha\mathbf{G}\tilde{\Phi}\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{s}_l(n)c(n) + \mathbf{u}_l(n), \quad (20)$$

其中, $\mathbf{s}_l(n)$ 表示 PTx 的发送符号向量, \mathbf{W} 表示主系统波束赋形矩阵, \mathbf{H} 表示 PTx 到 PRx 的直接链路信道, \mathbf{F} 表示 PTx 到 RIS 的前向链路信道, \mathbf{G} 表示 RIS 到 PRx 的后向链路信道, $\mathbf{u}_l(n) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2\mathbf{I})$ 表示加性高斯白噪声. 同样地, SRx 接收信号 $\tilde{\mathbf{y}}_l(n)$ 可表示为

$$\tilde{\mathbf{y}}_l(n) = \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{W}\mathbf{s}_l(n) + \alpha\tilde{\mathbf{G}}\tilde{\Phi}\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{s}_l(n)c(n) + \tilde{\mathbf{u}}_l(n), \quad (21)$$

其中, $\tilde{\mathbf{H}}$ 表示 PTx 到 SRx 的直接链路信道, $\tilde{\mathbf{G}}$ 表示 RIS 到 SRx 的后向链路信道, $\tilde{\mathbf{u}}_l(n) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2\mathbf{I})$ 表示加性高斯白噪声. 主次系统传输的可达速率可分别表示为

$$R_s = \mathbb{E}_c \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{H} + \alpha c(n)\mathbf{G}\tilde{\Phi}\mathbf{F})\mathbf{W}\mathbf{W}^H (\mathbf{H} + \alpha c(n)\mathbf{G}\tilde{\Phi}\mathbf{F})^H \right) \right], \quad (22)$$

$$R_c = \frac{1}{L} \log_2 \left(1 + \frac{\alpha^2 L}{\sigma^2} \text{tr}(\tilde{\mathbf{G}}\tilde{\Phi}\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{W}^H \mathbf{F}^H \tilde{\Phi}^H \tilde{\mathbf{G}}^H) \right). \quad (23)$$

7.3 联合波束赋形设计

RIS 具备被动式波束赋形的能力, 因此可以联合设计主被动波束赋形矩阵, 实现主次系统传输性能的提升. 文献 [56] 研究了 MIMO 场景下可满足主次系统性能需求条件的主系统发送功率最小化问

²⁾ 值得指出的是, 图 8(b) 所示的系统模型与 RIS 辅助的无线通信模型在模型拓扑结构上有一些相似之处, 但是它们在功能上有着很大的区别. 具体地, 在基于 RIS 的共生散射通信系统模型中, RIS 利用空中调制技术传输自身的信息, 并辅助主系统通信, 而在基于 RIS 辅助的无线通信模型中, RIS 只用于辅助传统无线通信系统传输.

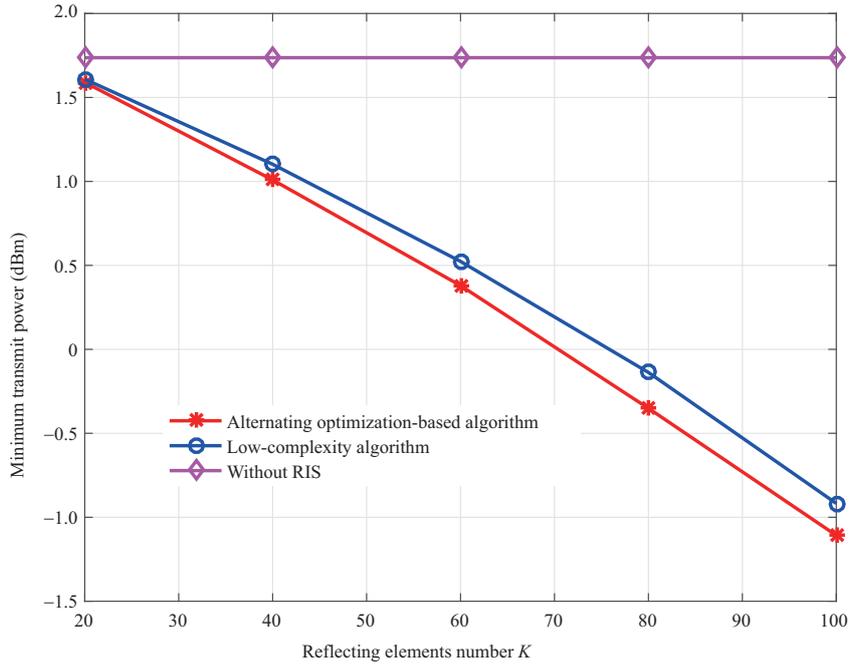


图 9 (网络版彩图) 基于 RIS 的共生散射通信系统中最小发送功率与 RIS 反射单元数的关系

Figure 9 (Color online) Relationship between the minimum transmit power and reflecting elements number in RIS-assisted symbiotic backscatter communications

题, 即

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{W}, \tilde{\Phi}} \quad & \text{tr}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H) \\ \text{s.t.} \quad & R_s(\mathbf{W}, \tilde{\Phi}) \geq \tilde{R}_s, \end{aligned} \quad (24a)$$

$$R_{b,s}(\mathbf{W}, \tilde{\Phi}) \geq \tilde{R}_s, \quad (24b)$$

$$\gamma_c(\mathbf{W}, \tilde{\Phi}) \geq \tilde{\gamma}_c, \quad (24c)$$

$$|\theta_k| = 1, \quad k = 1, \dots, K, \quad (24d)$$

其中, \tilde{R}_s 表示主系统传输速率的性能指标, $R_{b,s}$ 表示 SRx 采用最大似然联合检测时主系统信号的可达速率, 条件 (24b) 用以保证 SRx 可联合恢复出 $s_l(n)$ 和 $c(n)$. 文献 [56] 考虑 STx 采用 BPSK 调制, 故采用信噪比作为传输性能指标, $\tilde{\gamma}_c$ 表示该性能指标. 该文献设计出两种联合波束赋形设计方案: 一种是基于交替优化的设计方案, 将上述优化问题分解为多个子问题, 并采用矩阵理论和凸优化理论进行求解; 另一种方案为低复杂度设计方案, 通过求解反射链路增强问题来设计被动式波束赋形矩阵 $\tilde{\Phi}$, 再依据此结果设计主动式波束赋形矩阵 \mathbf{W} . 图 9 示出了该方案下 PTx 最小发送功率与 RIS 反射单元数的关系, 其中, 扩频因子为 $L = 64$, PTx, PRx, 以及 SRx 配置 4 根天线. 由此图可以看出, 将 RIS 引入至共生散射通信系统可以显著地降低 PTx 的发送功率, 提高系统的能量效率.

表 2 [56, 58~64] 总结了基于 RIS 的共生散射通信联合波束赋形设计研究现状. 针对分离式共生散射通信模型, 文献 [58] 关注下行多输入单输出 (multiple-input single-output, MISO) 单用户场景, 研究了 PTx 和 RIS 的联合波束赋形设计方案, 在保证主系统性能的条件下最大化次系统的可达速率, 该文献通过半正定松弛和块坐标下降算法进行交替求解, 同时针对可达速率表达式中难于直接求解的期

表 2 基于 RIS 的共生散射通信联合波束赋形设计

Table 2 Joint beamforming design for RIS-assisted symbiotic backscatter communications

References	System model	Scenario	Design objective
[56]	Detached model	Single-user MIMO	Minimize the transmit power
[58]	Detached model	Single-user MISO	Maximize the achievable rate of secondary transmission
[59]	Detached model	Multi-user broadcast	Minimize the transmit power
[60]	Detached model	Multi-user multicast	Minimize the transmit power
[61]	Detached model	Multi-user broadcast, physical layer security	Maximize the minimum secrecy rate
[62]	Integrated model	Single-user MISO	Minimize the transmit power of the primary transmission
[63]	Integrated model	Single-user MISO	Minimize the bit error rate
[64]	Integrated model	Multiple-user MISO	Maximize the weighted sum rate of the primary and secondary transmissions

望值, 利用拉格朗日 (Lagrange) 对偶以及 Jensen 不等式两种方法进行求解. 文献 [59] 关注基于 RIS 的共生散射通信广播系统, 其中 PTx 在 RIS 的辅助下发送广播信号给多个 PRx, 同时 RIS 传输自身信息给 SRx, 该文献研究了该场景下的发送功率最小化问题, 并针对性地提出两种求解算法以实现性能和复杂度的折中. 文献 [60] 关注基于 RIS 的共生散射通信多播系统, 其中 PRx 分成多个簇, PTx 向多个簇多播信息, 簇内的 PRx 共享信息, RIS 则辅助这一多播过程并传输自身信息, 该文献研究了该场景下的发送功率最小化问题, 并利用交替优化、二次变换, 以及半正定松弛算法进行求解. 文献 [61] 研究了物理层安全下的基于 RIS 的共生散射通信, 其中 PTx 同时传输信息给多个用户, 多用户之间互相窃听, 该文献通过联合设计 PTx 和 RIS 的波束赋形方案, 使多个用户中最小的安全速率最大化.

针对分离式共生散射通信模型, 文献 [62] 研究了单用户 MISO 场景下的发送功率最小化问题, 进而联合设计 PTx 和 RIS 的波束赋形方案, 该文献还考虑了不同 RIS 相位设置对于发送功率的影响, 当 RIS 量化比特数达到 3 比特时, 便已经可以逼近连续相位的结果. 文献 [63] 推导了该场景互惠共生和寄生关系下 RIS 符号的误码率, 并研究了主系统最小传输速率约束下的次系统误码率最小化问题. 结果表明, 通过联合优化系统的主被动波束赋形, 可以显著降低次系统的误码率, 同时, 将 RIS 靠近 PTx 或者 IRx 放置能获得更好的误码率性能. 文献 [64] 则将其扩展至多用户 MISO 场景, 其中 PTx 同时传输信息给多个 IRx, 并且多个 RIS 分别将信息传输给其关联的 IRx, 该文献研究了主次系统加权和速率最大化问题, 并采用分式规划和交替优化算法进行求解.

8 共生散射通信在 6G 中的应用

本节将以大规模机器类通信 (massive machine-type communications, mMTC) 与增强移动宽带 (enhanced mobile broadband, eMBB) 一体化以及通信感知一体化两个共生散射通信在 6G 中的典型应用场景为例, 介绍共生散射通信在 6G 中的技术优势及应用前景.

8.1 mMTC 与 eMBB 一体化

6G 网络需要同时支撑移动宽带业务与大规模机器类业务. 共生散射通信实现了频谱与能量域的互惠共享, 为这两项业务的高效联合承载提供了机遇, 有望在 6G 的万物智联场景中发挥重要作用. 具体地, 共生散射通信系统架构可分为以用户为中心和以基站为中心两种, 如图 10 所示. 在图 10(a) 中, STx (如物联网设备) 利用来自基站的下行链路信号将信息发送给用户, 用户充当中央单元来获取周围 STx 的信息. 在图 10(b) 中, STx 利用来自用户的上行链路信号将信息发送给基站, 基站作为中央单元来获取周围 STx 的信息.

体域网健康网是 mMTC 与 eMBB 一体化的一个重要应用, 健康监测传感器利用下行链路信号, 将人体健康状况实时传输至手机等中央处理单元, 实现人体健康智能监测^[65]. 该场景对健康监测传感器的尺寸和功耗提出了极高的要求, 共生散射通信在该场景中有极大的应用潜力. 一方面, STx 的反向散射电路简单, 且尺寸小, 满足监测传感器的尺寸需求; 另一方面, STx 采用无源方式传输信息, 功耗极低, 不会对人体产生伤害. 出于安全性与可靠性考虑, 共生散射通信在体域网中的应用集中在智能手环等穿戴式设备. 而针对心脏起搏器、胰岛素泵等植入式设备, 反射信号可严格限制在人体表面很近的区域内 (距离皮肤表面小于 0.15 m)^[66], 进而提高安全性与可靠性.

环境监测是 mMTC 与 eMBB 一体化的另一重要应用. 该应用通过大量部署的环境监测传感器, 实现对周边环境实时精准地监控和感知. 无线传感器的功耗和传输范围是环境监控系统设计面临的两个主要问题^[67], 功耗问题在地质灾害环境监测中显得尤为突出. 为了尽可能减小或避免山体滑坡、泥石流等地质灾害带来的损失与伤害, 通过部署地质灾害监测网络随时感知地形变化、降雨等环境状况, 并在发生地质灾害时及时发出预警. 但地质灾害多发生在山区, 往往没有稳定的电力供应. 共生散射通信的成本低且功耗低, 可以借由信号较强的环境射频信号, 如电视广播信号, 进行信息传输以及能量收集, 因此可以用在地质灾害监测网络. 将 RIS 引入环境监测网络, 可以进一步扩大通信范围, 提高监测的准确性与可靠性.

8.2 通信感知一体化

随着通信频谱向毫米波、太赫兹等更高频段发展, 无线通信与传统感知利用的频段将产生越来越多的重叠. 为充分利用频谱, 避免通信与感知之间的干扰, 降低设备成本, 将通信与感知进行联合设计是技术与产业发展的优选路径^[68]. 同时, 由于可使用的频段更高、大规模天线阵列分布更密集, 单个系统便可以集成通信与感知两大功能. 因此, 通信与感知将在 6G 网络中深度融合, 达到通信感知一体化 (integrated sensing and communication, ISAC). 在 ISAC 系统中, 对目标的定位、识别等感知功能可以利用通信信号来实现, 同时通信系统也可以利用感知获得的环境信息进行更精准地资源分配, 实现频谱与能量等资源的高效利用.

通信感知一体化的核心设计理念是让通信与感知两个相对独立的功能在同一系统中实现且互惠互利^[68, 69]. 共生散射通信中天然包含着这种通信与感知的融合关系. STx 可以被视为感知系统中的探测目标, 而 PTx 和 IRx 则作为感知信号发射器和感知信号接收器. PTx 将 ISAC 信号发送到 IRx, 同时 STx 将 ISAC 信号反射到 IRx. IRx 可以利用 STx 反射信号的时延与多普勒频移来估计其位置和移动速度, 同时实现与 PTx 的通信.

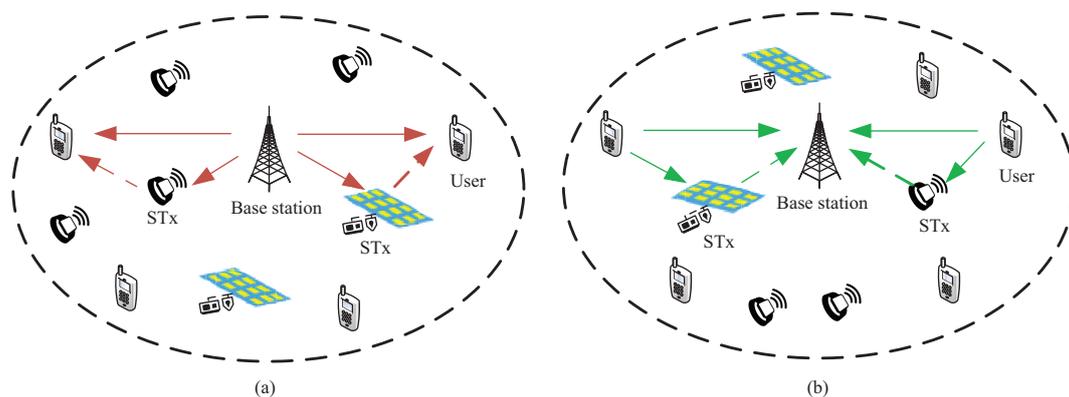


图 10 (网络版彩图) 共生散射通信系统架构

Figure 10 (Color online) System architecture for symbiotic backscatter communications. (a) User-centric; (b) base station-centric

9 未来研究展望

共生散射通信因其低功耗、高谱效, 以及互惠传输的特性获得了学术界及工业界的广泛关注, 有望成为 6G 的关键使能技术之一. 然而, 共生散射通信是一种新兴技术, 在理论研究及产业应用等方面仍面临诸多挑战, 本节旨在展望共生散射通信技术的潜在研究方向, 为后续研究提供思考和启发.

9.1 信道估计与系统同步

现有关于共生散射通信信道估计问题的研究较少, 而在这些少有的研究中, 所提出方法的计算复杂度通常较高^[27, 70], 因此设计合理的导频传输方案, 提出低复杂度且高精度的信道估计算法也是值得探索的研究方向. 在系统同步方面, 现有研究中同步算法精度较低, 如何设计高精度且低复杂度的同步算法对于共生散射通信来说至关重要. 此外, 由于在反射链路中主次系统发送符号是相乘的关系, 当两系统信号不同步时, 将会产生频谱拓展现象, 分析此现象对共生散射通信系统的影响是一项重要的研究工作.

9.2 多用户检测与接入

不同于传统的加性多址接入, 共生散射通信涉及一种新型的乘性多址接入方式, 该特性为多用户检测带来了两方面挑战: 一方面, 主次系统信号的相乘特性使得传统的多用户检测方案无法直接适用; 另一方面, 如何设计多用户检测方案以确保整个系统的互惠增益是一个重要的研究问题. 此外, STx 的反射特性将使系统的电磁环境变得更加复杂, 如何设计多用户的接入协议, 既保证设备间的公平性又兼顾系统负载的轻便性, 是一个值得探索的研究方向.

9.3 物理层安全

共生散射通信中主次系统的关联特性带来了一些新型的物理层安全问题. 由于主次系统存在合作, 当攻击者攻击主系统传输时, 次系统性能也会受到影响, 反之亦然. 然而, 次系统的反射特性为解决该问题带来了新的方向, 其核心思想是利用 STx 对传输环境的可控性, 动态改变传输环境, 从而避免主次系统被攻击. 因此, 从物理层研究共生散射通信面临的安全问题是一个重要的研究方向.

10 结束语

频谱资源短缺与传输能耗巨大是 6G 网络设计面临的关键问题. 共生散射通信因其在频谱与能量域的互惠共享特性而获得了广泛的研究. 本文对共生散射通信技术的基础概念、技术原理及研究现状进行了总结, 并对其在 6G 中的应用前景以及面临的挑战展开了探讨. 该技术有望成为 6G 中低功耗物联网的有效解决方案.

参考文献

- 1 IMT-2030(6G) Promotion Group. White Paper on 6G Vision and Candidate Technologies. White paper, 2021 [IMT-2030(6G) 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书. 白皮书, 2021]
- 2 Zhang L, Liang Y C, Niyato D. 6G visions: mobile ultra-broadband, super internet-of-things, and artificial intelligence. *China Commun*, 2019, 16: 1–14
- 3 You X H, Wang C X, Huang J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Sci China Inf Sci*, 2021, 64: 110301
- 4 Ericsson. Ericsson Mobility Report Q4 2021 Update. Ericsson Public Information, 2021. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>
- 5 Davaslioglu K, Ayanoglu E. Quantifying potential energy efficiency gain in green cellular wireless networks. *IEEE Commun Surv Tut*, 2014, 16: 2065–2091
- 6 Bi Q. Main challenges in the cellular industry and an outlook on 6G. *Mobile Commun*, 2020, 44: 10–16 [毕奇. 移动通信的主要挑战及 6G 的研究方向. *移动通信*, 2020, 44: 10–16]
- 7 Liang Y C, Chen K C, Li G Y, et al. Cognitive radio networking and communications: an overview. *IEEE Trans Veh Technol*, 2011, 60: 3386–3407
- 8 Liu V, Parks A, Talla V, et al. Ambient backscatter: wireless communication out of thin air. *SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2013, 43: 39–50
- 9 Liang Y C, Zhang Q, Larsson E G, et al. Symbiotic radio: cognitive backscattering communications for future wireless networks. *IEEE Trans Cogn Commun Netw*, 2020, 6: 1242–1255
- 10 Liang Y C, Long R Z, Zhang Q Q, et al. Symbiotic communications: where marconi meets darwin. *IEEE Wireless Commun*, 2022, 29: 144–150
- 11 Chen S Z, Liang Y C, Sun S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed. *IEEE Wireless Commun*, 2020, 27: 218–228
- 12 Nawaz S J, Sharma S K, Mansoor B, et al. Non-coherent and backscatter communications: enabling ultra-massive connectivity in 6G wireless networks. *IEEE Access*, 2021, 9: 38144–38186
- 13 Chowdhury M Z, Shahjalal M, Ahmed S, et al. 6G wireless communication systems: applications, requirements, technologies, challenges, and research directions. *IEEE Open J Commun Soc*, 2020, 1: 957–975
- 14 Arslan H, Tusha S D, Yazar A. 6G vision: an ultra-flexible perspective. *ITU J-FET*, 2020, 1: 121–140
- 15 Zhang Q Q, Liang Y C, Yang H C, et al. Mutualistic mechanism in symbiotic radios. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Madrid, 2021. 1–6
- 16 Zhang Q Q, Liang Y C, Yang H C, et al. Mutualistic mechanism in symbiotic radios: when can the primary and secondary transmissions be mutually beneficial? *IEEE Trans Wireless Commun*, 2022. doi: 10.1109/TWC.2022.3163735
- 17 Liang Y C, Long R Z, Zhang Q Q, et al. Large intelligent surface/antennas (LISA): making reflective radios smart. *J Commun Inf Netw*, 2019, 4: 40–50
- 18 Liang Y C, Chen J, Long R Z, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for smart wireless environments: channel estimation, system design and applications in 6G networks. *Sci China Inf Sci*, 2021, 64: 200301

- 19 Di Renzo M, Zappone A, Debbah M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2020, 38: 2450–2525
- 20 ElMossallamy M A, Zhang H L, Song L Y, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: principles, challenges, and opportunities. *IEEE Trans Cogn Commun Netw*, 2020, 6: 990–1002
- 21 Hansen R C. Relationships between antennas as scatterers and as radiators. *Proc IEEE*, 1989, 77: 659–662
- 22 Thomas S J, Reynolds M S. A 96 Mbit/sec, 15.5 pJ/bit 16-QAM modulator for UHF backscatter communication. In: *Proceedings of IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Orlando, 2012. 185–190
- 23 Yang G, Liang Y C, Zhang R, et al. Modulation in the air: backscatter communication over ambient OFDM carrier. *IEEE Trans Commun*, 2018, 66: 1219–1233
- 24 Zhang Q Q, Zhang L, Liang Y C, et al. Backscatter-NOMA: a symbiotic system of cellular and Internet-of-Things networks. *IEEE Access*, 2019, 7: 20000–20013
- 25 Zhao W J, Wang G P, Fan R F, et al. Ambient backscatter communication systems: capacity and outage performance analysis. *IEEE Access*, 2018, 6: 22695–22704
- 26 Yang G, Zhang Q Q, Liang Y C. Cooperative ambient backscatter communications for green Internet-of-Things. *IEEE Int Things J*, 2018, 5: 1116–1130
- 27 Kuai X Y, Yuan X J, Liang Y C. Message-passing receiver design for multiuser multi-backscatter-device symbiotic radio communications. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2022, 21: 4563–4578
- 28 Chen X H, Cheng H V, Shen K M, et al. Stochastic transceiver optimization in multi-tags symbiotic radio systems. *IEEE Int Things J*, 2020, 7: 9144–9157
- 29 Zhang Q Q, Guo H Y, Liang Y C, et al. Constellation learning-based signal detection for ambient backscatter communication systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2019, 37: 452–463
- 30 Zhang Y Y, Zhang Q Q, Liang Y C, et al. A semi-blind receiver for ambient backscatter communications with MPSK RF source. In: *Proceedings of IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops in China (ICCC Workshops)*, Changchun, 2019. 71–76
- 31 Wang G P, Gao F F, Fan R F, et al. Ambient backscatter communication systems: detection and performance analysis. *IEEE Trans Commun*, 2016, 64: 4836–4846
- 32 Qian J, Gao F F, Wang G P, et al. Semi-coherent detection and performance analysis for ambient backscatter system. *IEEE Trans Commun*, 2017, 65: 5266–5279
- 33 Tse D, Viswanath P. *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- 34 Guo H Y, Liang Y C, Long R, et al. Resource allocation for symbiotic radio system with fading channels. *IEEE Access*, 2019, 7: 34333–34347
- 35 Kang X, Liang Y C, Yang J. Riding on the primary: a new spectrum sharing paradigm for wireless-powered IoT devices. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2018, 17: 6335–6347
- 36 Guo H Y, Liang Y C, Long R Z, et al. Cooperative ambient backscatter system: a symbiotic radio paradigm for passive IoT. *IEEE Wireless Commun Lett*, 2019, 8: 1191–1194
- 37 Long R Z, Liang Y C, Guo H Y, et al. Symbiotic radio: a new communication paradigm for passive Internet of Things. *IEEE Int Things J*, 2019, 7: 1350–1363
- 38 Chu Z, Hao W M, Xiao P, et al. Resource allocations for symbiotic radio with finite blocklength backscatter link. *IEEE Int Things J*, 2020, 7: 8192–8207
- 39 Wu T, Jiang M, Zhang Q, et al. Beamforming design in multiple-input-multiple-output symbiotic radio backscatter systems. *IEEE Commun Lett*, 2021, 25: 1949–1953
- 40 Yang G, Wei T, Liang Y C. Joint hybrid and passive beamforming for millimeter wave symbiotic radio systems. *IEEE Wireless Commun Lett*, 2021, 10: 2294–2298
- 41 Long R Z, Guo H Y, Zhang L, et al. Full-duplex backscatter communications in symbiotic radio systems. *IEEE Access*,

- 2019, 7: 21597–21608
- 42 Long R Z, Liang Y C, Pei Y Y, et al. Active-load assisted symbiotic radio system in cognitive radio network. In: Proceedings of the 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Atlanta, 2020. 1–5
- 43 Zhang Q Q, Liang Y C, Poor H V. Intelligent user association for symbiotic radio networks using deep reinforcement learning. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2020, 19: 4535–4548
- 44 Liang Y C, Tan J J, Gong C, et al. Big data-based wireless communication technologies. *Sci Sin Inform*, 2021, 51: 1946–1964 [梁应敞, 谭俊杰, 龚晨, 等. 基于大数据的无线通信技术. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51: 1946–1964]
- 45 Zhang L, Feng G, Qin S, et al. Access control for ambient backscatter enhanced wireless Internet of Things. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2022, 21: 5614–5628
- 46 Yang H H, Ye Y H, Liang K, et al. Energy efficiency maximization for symbiotic radio networks with multiple backscatter devices. *IEEE Open J Commun Soc*, 2021, 2: 1431–1444
- 47 Han S Y, Liang Y C, Sun G L. The design and optimization of random code assisted multi-BD symbiotic radio system. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2021, 20: 5159–5170
- 48 Liu Y Y, Ren P Y, Du Q H. Symbiotic communication: concurrent transmission for multi-users based on backscatter communication. In: Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Nanjing, 2020. 835–839
- 49 Xu J R, Dai Z Y, Zeng Y. Enabling full mutualism for symbiotic radio with massive backscatter devices. In: Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Madrid, 2021. 1–6
- 50 Ding Z, Poor H V. Advantages of NOMA for multi-user BackCom networks. *IEEE Commun Lett*, 2021, 25: 3408–3412
- 51 Zhang R H X, Kang X, Liang Y C. Minimum throughput maximization for peer-assisted NOMA-plus-TDMA symbiotic radio networks. *IEEE Wireless Commun Lett*, 2021, 10: 1847–1851
- 52 Guo H Y, Liang Y C, Chen J, et al. Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2020, 19: 3064–3076
- 53 Ye J, Guo S S, Alouini M S. Joint reflecting and precoding designs for SER minimization in reconfigurable intelligent surfaces assisted MIMO systems. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2020, 19: 5561–5574
- 54 Yuan J, Liang Y C, Joung J, et al. Intelligent reflecting surface-assisted cognitive radio system. *IEEE Trans Commun*, 2021, 69: 675–687
- 55 Chen J, Liang Y C, Pei Y, et al. Intelligent reflecting surface: a programmable wireless environment for physical layer security. *IEEE Access*, 2019, 7: 82599–82612
- 56 Zhang Q Q, Liang Y C, Poor H V. Reconfigurable intelligent surface assisted MIMO symbiotic radio networks. *IEEE Trans Commun*, 2021, 69: 4832–4846
- 57 Wu M J, Lei X F, Zhou X Y, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted spatial modulation for symbiotic radio. *IEEE Trans Veh Technol*, 2021, 70: 12918–12931
- 58 Zhang Q Q, Liang Y C, Poor H V. Symbiotic radio: a new application of large intelligent surface/antennas (LISA). In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Seoul, 2020. 1–6
- 59 Xu X Y, Liang Y C, Yang G, et al. Reconfigurable intelligent surface empowered symbiotic radio over broadcasting signals. *IEEE Trans Commun*, 2021, 69: 7003–7016
- 60 Shu F Y, Yang G, Liang Y C. Reconfigurable intelligent surface enhanced symbiotic radio over multicasting signals. In: Proceedings of the 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki, 2021. 1–6
- 61 Wang C, Li Z, Zheng T X, et al. Intelligent reflecting surface-aided secure broadcasting in millimeter wave symbiotic radio networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 2021, 70: 11050–11055
- 62 Zhou H, Liang Y C, Kang X, et al. Cooperative beamforming for large intelligent surface assisted symbiotic radios. In: Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Taipei, 2020. 1–6

-
- 63 Hua M, Wu Q Q, Yang L X, et al. A novel wireless communication paradigm for intelligent reflecting surface based symbiotic radio systems. *IEEE Trans Signal Process*, 2021, 70: 550–565
- 64 Hu J L, Liang Y C, Pei Y Y. Reconfigurable intelligent surface enhanced multi-user MISO symbiotic radio system. *IEEE Trans Commun*, 2021, 69: 2359–2371
- 65 Otto C, Milenkovic A, Sanders C, et al. System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring. *J Mob Multimed*, 2006, 1: 307–326
- 66 Das D, Maity S, Chatterjee B, et al. Enabling covert body area network using electro-quasistatic human body communication. *Sci Rep*, 2019, 9: 1–14
- 67 Ullo S L, Sinha G R. Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors. *Sensors*, 2020, 20: 3113
- 68 IMT-2030(6G) Promotion Group. Research Report on Integrated Sensing and Communication Technology. Technical Report, 2021 [IMT-2030(6G) 推进组. 通信感知一体化技术研究报告. 2021]
- 69 Wang Z Q, Han K F, Jiang J M, et al. Symbiotic sensing and communications towards 6G: vision, applications, and technology trends. In: *Proceedings of the 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall)*, Norman, 2021. 1–5
- 70 Zhao W J, Wang G P, Atapattu S, et al. Channel estimation for ambient backscatter communication systems with massive-antenna reader. *IEEE Trans Veh Technol*, 2019, 68: 8254–8258

Symbiotic backscatter communications for 6G: principles, approaches, and applications

Qianqian ZHANG^{1,2}, Jun WANG^{1,2} & Ying-Chang LIANG^{1*}

1. *Center for Intelligent Networking and Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;*

2. *National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*

* Corresponding author. E-mail: ycliang@uestc.edu.cn

Abstract In recent years, due to the mutualistic sharing of spectrum and energy, symbiotic backscatter communications have attracted considerable attention and provided a potential solution to the spectrum and energy issues in 6G. In symbiotic backscatter communications, the secondary system uses the spectrum and radio frequency signal of the primary system for passive backscatter transmission. Meanwhile, the secondary transmission provides additional multipath to the primary system, which is expected to improve the performance of the primary system. First, the basic concepts and technical principles of symbiotic backscatter communications are introduced. Second, an overview of symbiotic backscatter communications is provided from the aspects of information theory, receiver design, resource allocation, and multiuser access. Third, the applications of the reconfigurable intelligent surface (RIS) in symbiotic backscatter communications are described, and the benefits brought by the introduction of RIS for symbiotic backscatter communications are analyzed and summarized. Finally, the 6G architecture and the application prospects of integrating the symbiotic backscatter communication are illustrated, and the challenges of the symbiotic backscatter communications are discussed.

Keywords 6G, symbiotic backscatter communications, reconfigurable intelligent surface, mutualistic symbiosis, spectrum efficiency, energy efficiency