

环境反向散射蜂窝网络下行链路级联干扰对齐算法

李世宝^{*①} 王晓莉^① 孙明玉^① 李佺玉^① 崔学荣^① 刘建航^②

^①(中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580)

^②(中国石油大学(华东)计算机科学与技术学院 青岛 266580)

摘要: 环境反向散射蜂窝网络能同时支持蜂窝网通信和环境反向散射通信,具有良好的应用前景,但环境反向散射的信号与蜂窝网络信号之间存在严重的互相干扰。针对这一问题,该文提出环境反向散射蜂窝网络的级联干扰对齐(CIA)算法。为了分别对齐基站信号对阅读器和用户的干扰,设计两层级联的预编码矩阵。充分考虑到反向散射节点计算能力弱,无法自主进行预编码矩阵设计的限制,结合基站到反向散射节点的信道状态信息对反向散射信号进行了预编码。并设计了对应用户的两层级联干扰抑制矩阵和阅读器的3层级联干扰抑制矩阵,将不同来源的干扰分层消除。仿真结果表明,所提算法能够消除环境反向散射蜂窝网络中的复杂干扰,保证蜂窝网络信号和反向散射信号正常传输,提高了系统和速率。

关键词: 蜂窝网络; 反向散射; 干扰对齐

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)07-2342-08

DOI: 10.11999/JEIT221534

Cascade Interference Alignment Algorithm for Ambient Backscatter Cellular Networks Downlink

LI Shibao^① WANG Xiaoli^① SUN Mingyu^① LI Quanyu^①

CUI Xuerong^① LIU Jianhang^②

^①(College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

^②(College of Computer Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Ambient backscatter cellular network can support both cellular communication and ambient backscatter communication, which has a broad application prospect, but there is serious interference between ambient backscatter signals and cellular network signals. To solve this problem, a Cascade Interference Alignment (CIA) algorithm for ambient backscatter cellular networks is proposed. In order to align the interference of base station signals to reader and users, a two-tier precoding matrix is designed. Considering the limitation that the computing capacity of the backscatter node is weak and it can not design the precoding matrix independently, the backscatter signal is pre-coded by combining the channel state information from the base station to the backscattering device. A two-tier interference suppressing matrix for users and a three-tier interference suppressing matrix for reader are designed to eliminate the interference from different sources. The simulation results show that the proposed algorithm can eliminate the complex interference in the ambient backscattering cellular network, ensure the normal transmission of the cellular network signal and backscattering signal, and provide the better sum rate performance.

Key words: Cellular networks; Backscatter; Interference alignment

收稿日期: 2022-12-12; 改回日期: 2023-05-30; 网络出版: 2023-06-09

*通信作者: 李世宝 lishibao@upc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61972417,61902431), 山东省自然科学基金(ZR2020MF005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61972417, 61902431), The Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020MF005)

1 引言

反向散射通信^[1]无需节点自身供电, 仅通过调制并反射射频源信号即可传输数据^[2,3], 具有低功耗、低成本的优点, 是物联网的关键使能技术之一。环境反向散射使用无处不在的周边环境信号作为射频源, 极大地拓展了应用场景, 推动了无源物联网的发展。Liu等人^[4]于2013年提出环境反向散射通信技术, 使用电视信号作为射频源, 摆脱了传统专用射频源的束缚。Bharadia等人^[5]提出了使用Wi-Fi作为环境反向散射通信的射频源, 并通过商用Wi-Fi接收机实现了高速的环境反向散射通信^[6]。移动蜂窝网络覆盖范围广、信号连续稳定, 非常适合作为环境反向散射通信的射频源, 推动了反向散射通信与蜂窝网络的融合, 在智能家居、智能交通、智慧农业等领域有广泛的应用前景。本文将环境反向散射通信与蜂窝网络融合共生的网络称为环境反向散射蜂窝网络。

蜂窝网络下行信号由基站发出, 信号强度较高, 一般将下行信号作为环境反向散射的射频源。环境反向散射蜂窝网络中蜂窝网信号和反向散射信号在时域、空域和频域多个维度重合, 干扰极为复杂, 使蜂窝网络和反向散射通信都不能正常工作^[7-9], 环境反向散射蜂窝网络中的复杂干扰问题亟待解决。

针对环境反向散射蜂窝网络中的干扰问题, 文献^[10]使用蜂窝网络中连续的LTE信号作为环境射频源, 设计了周期性信号同步方案和定时信号的相位调制方案, 避免了反向散射信号对原始LTE信号传输的影响, 但并未对多个反向散射节点并发产生的信号间干扰问题进行研究。文献^[11]考虑时分复用的反向通信网络, 多个节点轮流进行反向散射, 使节点既能从蜂窝信号中获得能量, 又可以从反向散射信号中回收能量, 并联合优化传输时间、波束形成向量和反射系数, 使系统的总能量效率最大化。时分复用^[11]、频分复用^[12]等正交技术将信道资源切分并分配给多个节点, 能够解决多节点的并发干扰。但时间、频率等信道资源有限, 随着系统内节点数量的增多, 每个节点分得的资源会越来越少, 造成通信质量和吞吐量的下降。通过协作, 反向散射链路和蜂窝链路能够实现互惠。文献^[13]使用连续干扰消除技术消除蜂窝信号对反向散射信号的干扰, 将反向散射信号视为蜂窝信号的多径信号分量, 设计波束形成方案来保证蜂窝信号的正常传输。文献^[14]进一步考虑了硬件损伤下的互惠环境反向散射通信, 为了最大化硬件损伤下协作环境反向散射网络中所有链路的加权和速率, 推导了最佳发射功率和最佳反射系数, 但实现互惠过程中的干

扰消除资源利用率仍有提升空间。文献^[15]使用非正交多址接入技术解决反向散射信号和蜂窝网络原始信号互相干扰的问题, 进行了功率域的资源分配, 带来了吞吐量的提升, 但其本质上与正交技术同属于信道复用技术, 每个用户的通信质量仍旧受到系统中用户数量的影响。上述研究对环境反向散射蜂窝网络中的复杂干扰问题考虑不全面, 且系统速率受到用户数量的限制, 必须要寻求更加有效的干扰管理方案。

干扰对齐技术^[16]在发送端将干扰通过预编码矩阵对齐到低维的干扰子空间中, 在接收端通过干扰抑制矩阵消除干扰, 使期望信号对齐到期望子空间中, 摆脱了用户数量的限制, 可以在相同的资源量下显著提高吞吐量。文献^[17]第1次将干扰对齐技术应用在蜂窝网络中, 对多小区的上行链路和下行链路进行了研究, 使用子空间干扰对齐来逼近蜂窝网络中理想的无干扰自由度。文献^[18]提出了蜂窝网络的最小干扰泄露算法, 利用信道互易性获取发射端信道状态信息, 通过不断迭代达到干扰对齐算法的收敛。文献^[19]针对蜂窝网络下行链路, 提出了回溯干扰再生算法和分布式回溯干扰对齐算法两种迭代算法, 使系统获得了更高的局部速率。文献^[20]在单向强干扰的蜂窝网络中设计了连续干扰消除和对齐算法, 通过迭代达到加权和速率最大化的目标, 提升了系统和速率。文献^[21]将干扰对齐算法的应用领域扩展到蜂窝异构网络中, 针对网络的部分连接特性和多层的复杂干扰, 提出了部分干扰对齐算法, 使用预编码矩阵将干扰部分对齐到几个干扰子空间中, 利用干扰的零空间传输期望信号, 实现了干扰对齐。

本文首次将干扰对齐应用于解决环境反向散射蜂窝网络中的复杂干扰, 在环境反向散射蜂窝网络中设计干扰对齐算法存在以下挑战:

(1) 与蜂窝网络相比, 环境反向散射蜂窝网络中存在反向散射信号间干扰和蜂窝信号与反向散射信号间干扰, 需要对齐并消除的干扰更多且更复杂。

(2) 反向散射节点计算能力弱, 不具备独立的预编码能力, 反向散射信号的预编码矩阵只能由基站代为设计, 但节点的反射将信号的传输链路分成两段, 使接收端设计对应的干扰抑制矩阵更困难。

针对上述挑战, 本文设计了环境反向散射蜂窝网络中的级联干扰对齐算法(Cascade Interference Alignment, CIA), 贡献如下:

(1) 利用反射前后的信号相关性, 在基站处设计了两层级联的预编码矩阵, 其内层矩阵对反向散射信号预编码, 外层矩阵对蜂窝信号预编码。与传

统通信中的干扰对齐算法相比,所设计的预编码矩阵既能为蜂窝信号预编码,又能结合基站到反射节点的信道状态信息为反向散射信号预编码。

(2) 结合预编码矩阵设计了用户的两层级联干扰抑制矩阵和阅读器的3层级联干扰抑制矩阵,将不同来源的干扰分层消除,提高了系统容量。

2 系统模型

本文所考虑的系统为环境反向散射蜂窝网络下行链路,包括 K 个基站、 K 个受到干扰的用户、 L 个无源反向散射节点、1个阅读器。基站发射的信号一部分直接被用户和反向散射阅读器接收,另一部分被反向散射节点调制并反射后到达用户和阅读器,到达同一接收端的信号之间互相干扰。节点使用来自基站的环境信号作为射频源,而不需要独立的射频源。节点处会接收到所有基站发射的信号,只有其中一个基站为期望的环境信号源,该基站的信号为阅读器的期望信号,其他基站为干扰环境信号源。

图1为环境反向散射蜂窝网络下行链路的系统模型图,包括3个基站、3个用户、2个反向散射节点、1个阅读器。每个基站有 M 根天线,每个节点有 X 根天线,每个用户接收端有 N 根天线,阅读器有 Q 根天线。绿色实线表示反射信号从节点到阅读器的传输链路,此链路不仅传输阅读器的期望信号,还传输来自干扰环境信号源的干扰信号。为避免线条杂乱,仅画出了基站1、用户1和节点1的全连接情况,但在接收信号的分析 and 干扰对齐算法的设计中,对所有节点的全连接情况都进行了充分的考虑。

选择基站1为节点1的期望环境信号源,其发射

信号为 s_1 ,则节点 l 接收到的信号 y_l 可以由式(1)来统一表示

$$y_l = \sqrt{\eta^l p} \mathbf{H} \mathbf{t}_1^l V_1 s_1 + \sum_{k=2}^K \sqrt{\eta^l p} \mathbf{H} \mathbf{t}_k^l V_k s_k + z_l \quad (1)$$

其中, y_l 表示节点 l 处的接收信号, $\mathbf{H} \mathbf{t}_k^l \in \mathbb{C}^{X \times M}$ 表示基站 k 到节点 l 之间的信道矩阵。实际上, $V_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 表示基站 k 所使用的预编码矩阵。 s_k 表示基站 k 发送的单数据流信号。 p 为基站的发射功率。 z_l 表示节点 l 处的零均值单位方差的高斯白噪声向量。节点 l 的接收信号 y_l 受独立同分布的高斯白噪声向量 z_l 的影响,其元素的均值为零,方差为1。其中 l 属于集合 $\{1, 2, \dots, L\}$, k 属于集合 $\{1, 2, \dots, K\}$ 。 η^l 是从基站 k 到节点 l 链路损失,是距离的函数。两者的关系可以表示为

$$10 \lg \eta^l = 40 \lg d_k^l + 30 \lg f + 49(\text{dB}) \quad (2)$$

其中, d_k^l 为基站 k 到节点 l 的距离,单位km, f 为载波信号频率,单位MHz。

考虑理想情况,基站信号能够为反向散射节点提供充足的能量,保证其正常工作。节点对基站信号进行调制,使其携带节点信息并反射发出,忽略节点的反射损耗,则此时节点反射的信号为

$$y_l = \sqrt{\eta^l p} \mathbf{H} \mathbf{t}_1^l V_1 s_1^l + \sum_{k=2}^K \sqrt{\eta^l p} \mathbf{H} \mathbf{t}_k^l V_k s_k^l + z_l \quad (3)$$

在式(3)中,信号产生变化, s_k^l 表示由原信号 s_k 带有节点 l 信息的新信号。

用户 k 接收到的信号由期望信号、其他用户的干扰信号、反向散射节点的干扰信号组成,如式(4)所示

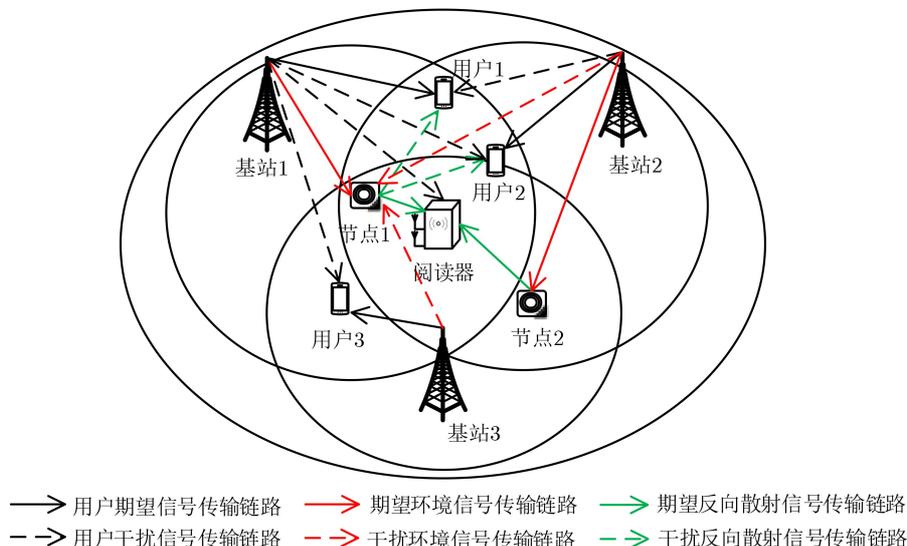


图1 环境反向散射蜂窝网络下行链路模型

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{\mathbf{u}_k} = & \sqrt{\eta_k^k} p \mathbf{H}_k^k \mathbf{V}_k s_k + \sum_{m=1, m \neq k}^K \sqrt{\eta_k^m} p \mathbf{H}_k^m \mathbf{V}_l s_l \\ & + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^K \sqrt{\eta r_l^k} p \sqrt{\eta t_j^l} \mathbf{H} \mathbf{r}_l^k \mathbf{H} \mathbf{t}_j^l \mathbf{V}_j s_j^l + \mathbf{z}_k \end{aligned} \quad (4)$$

$\mathbf{H}_k^m \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 表示基站 k 到用户 m 之间的信道矩阵, $\mathbf{H} \mathbf{r}_l^k \in \mathbb{C}^{N \times X}$ 表示节点 l 到用户 k 之间的信道矩阵, η_l^k 表示从节点 l 到用户 k 的链路损失, 其中 l 属于集合 $\{1, 2, \dots, L\}$, k 属于集合 $\{1, 2, \dots, K\}$ 。针对反向散射信道估计, 目前已有研究^[22], 当前系统模型考虑完美的信道状态信息

阅读器接收到的信号由反射信号、基站干扰信号组成, 其中反射信号又可分为来自期望环境信号源的反射信号和来自干扰环境信号源的反射信号, 经过接收端同步, 反射信号如式(5)所示

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_r = & \sum_{k=1}^K \sqrt{\eta_k} p \mathbf{H} \mathbf{b}_k \mathbf{V}_k s_k \\ & + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^K \sqrt{\eta r_l} p \sqrt{\eta t_j^l} \mathbf{H} \mathbf{r} \mathbf{b}_l \mathbf{H} \mathbf{t}_j^l \mathbf{V}_j s_j^l + \mathbf{z}_r \\ = & \sum_{k=1}^K \sqrt{\eta_k} p \mathbf{H} \mathbf{b}_k \mathbf{V}_k s_k \\ & + \sum_{l=1}^L \left(\sqrt{\eta r_l} p \sqrt{\eta t_1^l} \mathbf{H} \mathbf{r} \mathbf{b}_l \mathbf{H} \mathbf{t}_1^l \mathbf{V}_1 s_1^l \right. \\ & \left. + \sum_{k=2}^K \sqrt{\eta r_l} p \sqrt{\eta t_j^l} \mathbf{H} \mathbf{r} \mathbf{b}_l \mathbf{H} \mathbf{t}_j^l \mathbf{V}_j s_j^l \right) + \mathbf{z}_r \end{aligned} \quad (5)$$

$\mathbf{H} \mathbf{b}_k \in \mathbb{C}^{Q \times M}$ 表示基站 k 到阅读器之间的信道矩阵, $\mathbf{H} \mathbf{r} \mathbf{b}_l \in \mathbb{C}^{Q \times X}$ 表示 l 到阅读器之间的信道矩阵, ηr_l 是从节点 l 到阅读器的链路损失。

每个用户的瞬时可达速率为

$$R_k = \log_2 \left(1 + p \frac{\left| \sqrt{\eta_k^k} \mathbf{U}_k \mathbf{H}_k^k \mathbf{V}_k \right|^2}{\sigma^2 + I_k} \right) \quad (6)$$

$\mathbf{U}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 表示接收端用户的干扰抑制矩阵。 I_k 为第 k 个用户的干扰泄露值, 可以表示为

$$\begin{aligned} I_k = & p \sum_{l=1, l \neq k}^K \left| \sqrt{\eta_k^l} \mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_k^l \mathbf{V}_l \right|^2 \\ & + p \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^K \left| \sqrt{\eta r_l^k} \sqrt{\eta t_j^l} \mathbf{U}_k^H \mathbf{H} \mathbf{r}_l^k \mathbf{H} \mathbf{t}_j^l \mathbf{V}_j \right|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

在阅读器端, 每个节点信号的瞬时可达速率为

$$R_{r_l} = \log_2 \left(1 + p \frac{\left| \sqrt{\eta r_l} \sqrt{\eta t_1^l} \mathbf{W}_l \mathbf{H} \mathbf{r} \mathbf{b}_l \mathbf{H} \mathbf{t}_1^l \mathbf{V}_1 \right|^2}{\sigma^2 + \text{I}r_l} \right) \quad (8)$$

$\mathbf{W}_l \in \mathbb{C}^{Q \times 1}$ 表示阅读器端的干扰抑制矩阵, $\text{I}r_l$ 为接收端接收节点 l 反射的信号时的干扰泄露值, 可以表示为

$$\begin{aligned} \text{I}r_l = & p \sum_{k=1}^K \left| \sqrt{\eta_k} \mathbf{W}_l \mathbf{H} \mathbf{b}_k \mathbf{V}_k \right|^2 \\ & + p \sum_{i=1, i \neq l}^L \sum_{j=1}^K \left| \sqrt{\eta r_i} \sqrt{\eta t_j^i} \mathbf{W}_l \mathbf{H} \mathbf{r} \mathbf{b}_i \mathbf{H} \mathbf{t}_j^i \mathbf{V}_j \right|^2 \\ & + p \sum_{k=2}^K \left| \sqrt{\eta r_l} \sqrt{\eta t_j^k} \mathbf{W}_l \mathbf{H} \mathbf{r} \mathbf{b}_l \mathbf{H} \mathbf{t}_j^k \mathbf{V}_j \right|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

3 算法设计

为实现蜂窝信号和反向散射信号的可靠传输, CIA算法在基站端设计预编码矩阵 \mathbf{V}_k 、在用户端设计干扰抑制矩阵 \mathbf{U}_k 、在阅读器端设计干扰抑制矩阵 \mathbf{W}_l , 根据需要对齐和消除的干扰种类来分层并级联。 \mathbf{V}_k 的设计考虑基站信号分别对阅读器和用户的干扰, 分为两层。 \mathbf{U}_k 的分层设计则考虑用户的干扰情况, 将干扰信号分为来自反向散射节点的干扰信号和来自基站的干扰信号两种类型, 使用两层干扰抑制矩阵分别消除。阅读器端接收到的信号干扰情况更为复杂, 由来自基站的干扰信号、来自不同节点的反射信号、来自同一节点不同环境信号源的信号组成, 根据3种干扰类型, \mathbf{W}_l 分为3层设计。 $\mathbf{V}_k, \mathbf{U}_k, \mathbf{W}_l$ 级联关系及分别设计为

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{V}_{i_k} \mathbf{V}_{o_k} \quad (10)$$

$$\mathbf{U}_k = \mathbf{U}_{i_k} \mathbf{U}_{o_k} \quad (11)$$

$$\mathbf{W}_l = \mathbf{W}_i \mathbf{W}_m \mathbf{W}_o \quad (12)$$

(1) 设计用户内层的干扰抑制矩阵 \mathbf{U}_{i_k}

用户处收到的反向散射节点信号由 K 个基站信号经过 L 个节点反射形成的信号混合而成, 每个节点的混合信号通过同一段信道 $\mathbf{H} \mathbf{r}_l^k$ 传输到用户, 这些信号已经天然对齐到同一个信道空间。利用从节点到接收端的信道的零空间, 在每个用户处设计 $\mathbf{U}_{i_k} \in \mathbb{C}^{N \times N_i}$ 对齐来自 L 个节点的混合干扰, 使需要考虑的干扰由 KL 个变为 L 个, 降低了计算复杂度和 \mathbf{U}_{i_k} 的天线数要求。 \mathbf{U}_{i_k} 满足

$$\mathbf{U}_{i_k}^H = \text{null}(\mathbf{H} \mathbf{r}_1^{kH}, \mathbf{H} \mathbf{r}_2^{kH}, \dots, \mathbf{H} \mathbf{r}_L^{kH}) \quad (13)$$

根据齐次线性方程组的求解条件可知, 若要满足对齐条件, 必须满足

$$\left. \begin{aligned} N_i \cdot L & \leq X \\ 1 & \leq N_i \leq N \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(2) 设计内层的预编码矩阵 \mathbf{V}_{i_k}

为了减小阅读器解码的压力, 基站预先设计内

层的预编码矩阵 $\mathbf{V}_k \in \mathbb{C}^{M \times M}$, 把阅读器处来自多个基站的干扰信号对齐到一个空间 \mathbf{T} 中, 即

$$\mathbf{T} = \text{span}(\mathbf{H}\mathbf{b}_1^k \mathbf{V}_1) = \text{span}(\mathbf{H}\mathbf{b}_2^k \mathbf{V}_2) = \text{span}(\mathbf{H}\mathbf{b}_K^k \mathbf{V}_K) \quad (15)$$

(3) 设计外层预编码矩阵 $\mathbf{V}_{\mathbf{O}_k}$ 和外层干扰抑制矩阵 $\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k}$

以蜂窝网络用户处的干扰泄露最小化为目标, 通过迭代式干扰对齐算法^[14]来设计 $\mathbf{V}_{\mathbf{O}_k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 和 $\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k} \in \mathbb{C}^{P \times 1}$, 对齐并消除蜂窝网络中来自其他基站的非期望干扰。 $\mathbf{V}_{\mathbf{O}_k}$ 和 $\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k}$ 需要级联 \mathbf{V}_k 和 \mathbf{U}_k 进行设计。当迭代算法收敛后, 干扰泄露逼近0, $\mathbf{V}_{\mathbf{O}_k}$ 和 $\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k}$ 满足条件

$$\begin{aligned} & \text{span}(\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k} \mathbf{U}_k \mathbf{H}_1^k \mathbf{V}_1 \mathbf{V}_{\mathbf{O}_1}) \\ & \approx \text{span}(\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k} \mathbf{U}_k \mathbf{H}_2^k \mathbf{V}_2 \mathbf{V}_{\mathbf{O}_2}) \\ & \approx \text{span}(\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k} \mathbf{U}_k \mathbf{H}_{k-1}^k \mathbf{V}_{k-1} \mathbf{V}_{\mathbf{O}_{k-1}}) \\ & \approx \text{span}(\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k} \mathbf{U}_k \mathbf{H}_{k+1}^k \mathbf{V}_{k+1} \mathbf{V}_{\mathbf{O}_{k+1}}) \approx \dots \\ & \approx \text{span}(\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k} \mathbf{U}_k \mathbf{H}_K^k \mathbf{V}_K \mathbf{V}_{\mathbf{O}_K}) \\ & \approx 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\mathbf{U}_{\mathbf{O}_k} \mathbf{U}_k \mathbf{H}_k^k \mathbf{V}_k \mathbf{V}_{\mathbf{O}_k} = \mathbf{I} \quad (17)$$

级联内层与外层的预编码和干扰抑制矩阵, 由式(10)、式(11)、式(13)、式(15)、式(16)可得

$$\begin{aligned} \text{span}(\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_1^k) &= \text{span}(\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_2^k) = \dots \\ &= \text{span}(\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_L^k) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{span}(\mathbf{H}\mathbf{b}_1^k \mathbf{V}_1) = \text{span}(\mathbf{H}\mathbf{b}_2^k \mathbf{V}_2) = \text{span}(\mathbf{H}\mathbf{b}_K^k \mathbf{V}_K) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \text{span}(\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_1^k \mathbf{V}_1) \\ & \approx \text{span}(\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_2^k \mathbf{V}_2) \approx \dots \\ & \approx \text{span}(\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_{k-1}^k \mathbf{V}_{k-1}) \\ & \approx \text{span}(\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_{k+1}^k \mathbf{V}_{k+1}) \approx \dots \\ & \approx \text{span}(\mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_K^k \mathbf{V}_K) \\ & \approx 0 \end{aligned} \quad (20)$$

应满足天线条件

$$M + N_i - 1 \geq K \quad (21)$$

(4) 设计内层阅读器干扰抑制矩阵 \mathbf{W}_i

由式(14)可知, 内层预编码矩阵 \mathbf{V}_K 已经把来自基站的干扰信号对齐到空间 \mathbf{T} 中, 此时仅需通过同一个内层阅读器干扰抑制矩阵 $\mathbf{W}_i \in \mathbb{C}^{Q \times Q}$ 即可将来自基站的干扰信号对齐到零空间, 即

$$\mathbf{W}_i = \text{null}(\mathbf{T}) \quad (22)$$

应满足天线条件

$$\left. \begin{aligned} 1 &\leq Q \leq M \\ 1 &\leq Q_i \leq Q \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

(5) 设计中层阅读器干扰抑制矩阵 $\mathbf{W}_{\mathbf{m}_l}$

设计 L 个中层阅读器干扰抑制矩阵 $\mathbf{W}_{\mathbf{m}_l} \in$

$\mathbb{C}^{Q_i \times Q_m}$, 级联 \mathbf{W}_i , 利用反向散射节点到阅读器的信道矩阵来对齐来自除期望反向散射节点外的其他节点干扰, $\mathbf{W}_{\mathbf{m}_l}$ 满足条件

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\mathbf{m}_l} = \text{null}(\mathbf{W}_i \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_1^H, \mathbf{W}_i \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_2^H, \dots, \mathbf{W}_i \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_{l-1}^H, \\ \mathbf{W}_i \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_{l+1}^H, \dots, \mathbf{W}_i \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_L^H) \end{aligned} \quad (24)$$

应满足天线条件

$$\left. \begin{aligned} Q_i \cdot (L-1) &\leq X \\ 1 &< Q_m < Q_i \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

(6) 设计外层阅读器干扰抑制矩阵 $\mathbf{W}_{\mathbf{O}_l}$

经过之前的设计, 系统中仅剩余来自不同基站、经过同一反向散射节点反射形成的混合信号。为降低计算复杂度, CIA算法选择仅解出来自期望环境信号源的信号, 设计 L 个外层阅读器干扰抑制矩阵 $\mathbf{W}_{\mathbf{O}_l} \in \mathbb{C}^{Q_m \times 1}$, 级联 \mathbf{W}_i , $\mathbf{W}_{\mathbf{m}_l}$, 对齐来自干扰环境信号源的信号, 令

$$\left. \begin{aligned} Q_i \cdot (L-1) &\leq X \\ 1 &< Q_m < Q_i \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

则 $\mathbf{W}_{\mathbf{O}_l}$ 满足条件

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\mathbf{O}_l} = \text{null}(\mathbf{V}_1^H \mathbf{H}\mathbf{t}_1^H \mathbf{T}_l, \mathbf{V}_2^H \mathbf{H}\mathbf{t}_2^H \mathbf{T}_l, \dots, \mathbf{V}_{m-1}^H \mathbf{H}\mathbf{t}_{m-1}^H \mathbf{T}_l, \\ \mathbf{V}_{m+1}^H \mathbf{H}\mathbf{t}_{m+1}^H \mathbf{T}_l, \dots, \mathbf{V}_K^H \mathbf{H}\mathbf{t}_K^H \mathbf{T}_l) \end{aligned} \quad (27)$$

应满足天线条件

$$K - 1 \leq Q_m \quad (28)$$

级联阅读器端的干扰抑制矩阵, 由式(12)、式(19)、式(22)、式(24)、式(27)可得

$$\begin{aligned} \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{b}_1^k \mathbf{V}_1) &= \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{b}_2^k \mathbf{V}_2) \\ &= \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{b}_K^k \mathbf{V}_K) = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_1) &= \dots = \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_{l-1}) \\ &= \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_{l+1}) = \dots \\ &= \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_L) = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_l \mathbf{H}\mathbf{t}_1^l \mathbf{V}_1) \\ &= \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_l \mathbf{H}\mathbf{t}_2^l \mathbf{V}_2) = \dots \\ &= \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_l \mathbf{H}\mathbf{t}_{m-1}^l \mathbf{V}_{m-1}) \\ &= \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_l \mathbf{H}\mathbf{t}_{m+1}^l \mathbf{V}_{m+1}) = \dots \\ &= \text{span}(\mathbf{W}_l^H \mathbf{H}\mathbf{r}\mathbf{b}_l \mathbf{H}\mathbf{t}_K^l \mathbf{V}_K) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (31)$$

由式(23)、式(25)、式(27)可得

$$\left. \begin{aligned} Q &\geq K - 1 \\ X &\geq (K - 1) \cdot (L - 1) \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

反向散射节点的计算能力较弱, 难以独立设计预编码矩阵, 因此CIA利用基站处的预编码, 结合从基站到反向散射节点的信道完成对反向散射信号的预编码。在级联预编码矩阵设计中, 在基站处首先进行内层的预编码矩阵设计, 把来自基站的干扰

信号对齐到一个空间中，内层预编码矩阵的设计使阅读器设计干扰抑制矩阵时需要的对齐空间变少，节省大量用来构成对齐空间的的天线，同时不会对消除蜂窝信号间干扰的迭代干扰对齐算法造成影响。在基站和用户天线数不足的情况下，迭代干扰对齐算法无法收敛，外层预编码矩阵与用户外层干扰抑制矩阵的设计无法完成，原蜂窝网络中用户的信号的传输速率受到极大影响。但基站处内层的预编码矩阵设计不会受到影响，当阅读器天线数足够时，反向散射信息仍可以正常传输。

4 仿真与结果分析

实验所模拟的系统为3个基站，3个用户，2个反向散射节点和1个阅读器所组成的环境反向散射蜂窝下行链路。每个用户有唯一的期望信号，会接收两个非期望的来自基站的干扰信号和两个非期望的来自反向散射节点的混合干扰信号。每个节点的混合干扰信号由基站发出并经过节点反射的信号混合而成。阅读器会接收3个来自基站的直链干扰信号，并需要分别解出两个携带节点信息的期望信号。在阅读器端，解出节点反射的来自期望环境信号源的信号，将来自3个基站的信号、经此节点反射的来自干扰环境信号源的两个信号和来自另一节点的混合干扰信号对齐到期望信号的零空间。

图2为执行CIA算法后，环境反向散射蜂窝网络实现的速率图。随着信噪比的增大，图线近似为一条直线，说明所考虑的干扰已经被对齐消除。在环境反向散射蜂窝网络中，使用传统蜂窝网络中的算法只能对齐用户间干扰，而反向散射信号的干扰不能被消除，导致系统的传输速率严重下降。而CIA算法能够消除干扰，达到了黑线所示的和速率。当反向散射节点数目为0时，环境反向散射蜂窝网络退化为一般的蜂窝网络，系统中只存在用户间干扰，CIA算法仍然有效，能够消除干扰，达到蓝线所示的和速率。当用户数目为1时，环境反向散射蜂窝网络退化为仅包含单一射频源的反向散射网络，CIA算法能解决反向散射信号的冲突问题，消除反向散射信号与唯一的蜂窝信号之间的干扰，达到红线所示的和速率。对比蓝线，黑线拥有更高的和速率，说明所提算法有效提升了系统容量。

图3为在环境反向散射蜂窝网络中，基站、用户、阅读器天线为7，反向散射节点天线数为3时，使用CIA算法所能达到的蜂窝网络用户和速率、阅读器系统和速率的结果曲线。系统中天线用于对齐用户干扰的天线不足以使算法收敛时，蜂窝网络用户的和速率受到了影响。在基站天线数不为0的条件下，CIA算法进行内层预编码设计，使其不受迭

代算法收敛性的影响，将蜂窝用户信号对阅读器期望信号的干扰对齐到一个空间。阅读器需要对齐的干扰变少，天线数与用户天线数相同时足以对齐剩余干扰，因此信号传输情况如红线所示，不受基站和用户天线数影响，仍能保证可靠传输。

在环境反向散射蜂窝网络中，反向散射节点接收多个环境信号源的信号并携带节点信息反射发出。所提出的CIA算法对每个节点收到并反射的3个信号，仅选取1个信号解出。图4对比了选择不同期望环境信号源的系统速率和速率。黑线与红线分别

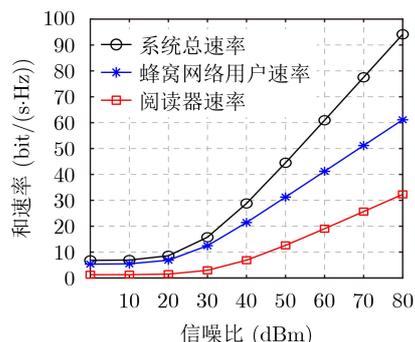


图2 CIA算法的和速率曲线

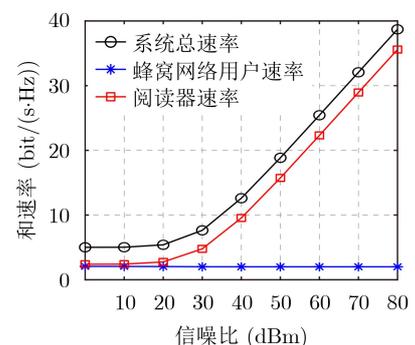


图3 天线数不足以对齐用户干扰的速率曲线

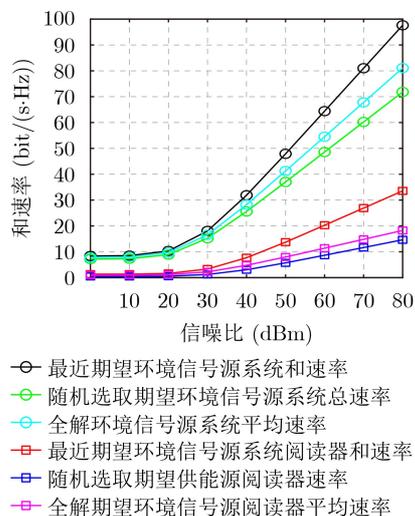


图4 选择不同期望环境信号源的系统速率对比曲线

表示对每个节点选取距离最近、链路损失最小的期望环境源时的系统和速率与阅读器和速率。青绿线和粉线表示将3个环境信号源都作为期望环境信号源，将反向散射节点反射的3个信号全部解出时，系统和速率与阅读器的平均速率。由于解出的3个信号都包含同样的反向散射节点信息，因此使用平均值来衡量其综合传输速率。对比红线与粉线、黑线与青绿线可知，所提CIA算法在降低计算复杂度的情况下，仅解出1个信号即可达到与解出全部信号同样的干扰消除效果。绿线和蓝线分别表示随机选择环境信号源所达到的系统和速率与阅读器和速率，与黑线和红线相比，由于随机选择环境信号源的链路损失更大，所达到的系统和速率较低，但CIA算法仍能解决信号间的干扰问题，实现可靠传输。

5 结束语

本文提出了环境反向散射蜂窝网络下行链路级联干扰对齐算法。CIA算法考虑反射前后的两段信道的特殊情况，针对反向散射节点没有独立预编码能力的问题，合理设计干扰对齐顺序，在基站处设计级联的预编码矩阵，在用户处设计干扰抑制矩阵，在阅读器端选择期望环境信号源的反射信号并设计干扰抑制解码矩阵。所设计的预编码矩阵既能对基站信号进行预编码，又能结合基站到反向散射节点的信道状态信息对反向散射信号进行预编码。所设计的阅读器干扰抑制矩阵消除了混合的反向散射节点反射信号中的非期望发射源信号，降低了算法复杂度。实验结果表明，在天线数满足算法收敛条件的情况下，CIA算法能够解决蜂窝信号和反向散射信号的干扰问题，保证系统正常通信，提高了系统和速率。

参 考 文 献

- [1] STOCKMAN H. Communication by means of reflected power[J]. *Proceedings of the IRE*, 1948, 36(10): 1196–1204. doi: [10.1109/JRPROC.1948.226245](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1948.226245).
- [2] BLETSAS A, SIACHALOU S, and SAHALOS J N. Anti-collision tags for backscatter sensor networks[C]. The 38th European Microwave Conference, Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2008: 179–182. doi: [10.1109/EUMC.2008.4751417](https://doi.org/10.1109/EUMC.2008.4751417).
- [3] KIMIONIS J, BLETSAS A, and SAHALOS J N. Bistatic backscatter radio for power-limited sensor networks[C]. 2013 IEEE Global Communications Conference, Atlanta, USA: IEEE, 2013: 353–358. doi: [10.1109/GLOCOM.2013.6831096](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2013.6831096).
- [4] LIU V, PARKS A, TALLA V, et al. Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, 43(4): 39–50. doi: [10.1145/2534169.2486015](https://doi.org/10.1145/2534169.2486015).
- [5] BHARADIA D, JOSHI K R, KOTARU M, et al. BackFi: High throughput WiFi backscatter[J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2015, 45(4): 283–296. doi: [10.1145/2829988.2787490](https://doi.org/10.1145/2829988.2787490).
- [6] ZHANG Pengyu, BHARADIA D, JOSHI K, et al. HitchHike: Practical backscatter using commodity WiFi[C]. The 14th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems CD-ROM, Stanford, USA, 2016: 259–271. doi: [10.1145/2994551.2994565](https://doi.org/10.1145/2994551.2994565).
- [7] ZHENG Guangyuan, WEN Miaowen, CHEN Yingyang, et al. Interference exploitation for ambient backscatter communication networks via symbol level precoding[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(6): 1166–1170. doi: [10.1109/LWC.2022.3159777](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3159777).
- [8] GUO Wenbo, ZHAO Hongzhi, SONG Changqing, et al. Direct-link interference cancellation design for backscatter communications over ambient DVB signals[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2022, 68(2): 317–330. doi: [10.1109/TBC.2022.3142962](https://doi.org/10.1109/TBC.2022.3142962).
- [9] BISWAS R, SHEIKH M U, YİĞİTLER H, et al. Direct path interference suppression requirements for bistatic backscatter communication system[C]. 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference, Helsinki, Finland, 2021: 1–5. doi: [10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448755](https://doi.org/10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448755).
- [10] CHI Zicheng, LIU Xin, WANG Wei, et al. Leveraging ambient LTE traffic for ubiquitous passive communication[C/OL]. The Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication, 2020: 172–185. doi: [10.1145/3387514.3405861](https://doi.org/10.1145/3387514.3405861).
- [11] GU Bowen, LI Dong, XU Yongjun, et al. Many a little makes a mickle: Probing backscattering energy recycling for backscatter communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(1): 1343–1348. doi: [10.1109/TVT.2022.3205888](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3205888).
- [12] ROSENTHAL J D and REYNOLDS M S. Hardware-efficient all-digital architectures for OFDM backscatter modulators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(1): 803–811. doi: [10.1109/TMTT.2020.3038860](https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.3038860).
- [13] LONG Ruizhe, LIANG Yingchang, GUO Huayan, et al. Symbiotic radio: A new communication paradigm for passive internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(2): 1350–1363. doi: [10.1109/JIOT.2019.2954678](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2954678).
- [14] YE Yinghui, SHI Liqin, CHU Xiaoli, et al. Mutualistic cooperative ambient backscatter communications under hardware impairments[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(11): 7656–7668. doi: [10.1109/COMM.2022.3142962](https://doi.org/10.1109/COMM.2022.3142962).

- TCOMM.2022.3201119.
- [15] ZHANG Qianqian, ZHANG Lin, LIANG Yingchang, *et al.* Backscatter-NOMA: A symbiotic system of cellular and internet-of-things networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 20000–20013. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2897822](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897822).
- [16] JAFAR S A and SHAMAI S. Degrees of freedom region of the MIMO X channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(1): 151–170. doi: [10.1109/TIT.2007.911262](https://doi.org/10.1109/TIT.2007.911262).
- [17] SUH C and TSE D. Interference alignment for cellular networks[C]. The 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Monticello, USA, 2008: 1037–1044. doi: [10.1109/ALLERTON.2008.4797673](https://doi.org/10.1109/ALLERTON.2008.4797673).
- [18] MUNGARA R K, TÖLLI A, and JUNTTI M. Degrees of freedom and interference mitigation for MIMO interfering broadcast channels[C]. 2011 IEEE GLOBECOM Workshops, Houston, USA, 2011: 441–446. doi: [10.1109/GLOCOMW.2011.6162488](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2011.6162488).
- [19] LI Jingfu, FENG Wenjiang, YU F R, *et al.* Two new kinds of interference alignment schemes for cellular K -user MIMO downlink networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(11): 11827–11842. doi: [10.1109/TVT.2021.3115806](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3115806).
- [20] SUO Long, LI Hongyan, ZHANG Shun, *et al.* Successive interference cancellation and alignment in K -user MIMO interference channels with partial unidirectional strong interference[J]. *China Communications*, 2022, 19(2): 118–130. doi: [10.23919/JCC.2022.02.010](https://doi.org/10.23919/JCC.2022.02.010).
- [21] LIU Guoqing, SHENG Min, WANG Xijun, *et al.* Interference alignment for partially connected downlink MIMO heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(2): 551–564. doi: [10.1109/TCOMM.2015.2388450](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2388450).
- [22] MISHRA D and LARSSON E G. Multi-tag backscattering to MIMO reader: Channel estimation and throughput fairness[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(12): 5584–5599. doi: [10.1109/TWC.2019.2937763](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2937763).
- 李世宝: 男, 教授, 研究方向为移动计算、无线传感器网络、干扰对齐等。
- 王晓莉: 女, 硕士生, 研究方向为无线通信、干扰对齐等。
- 孙明玉: 女, 硕士生, 研究方向为无线通信、干扰对齐。
- 李佺玉: 女, 硕士生, 研究方向为无线通信、非正交多址接入等。
- 崔学荣: 男, 教授, 研究方向为水下通信、探测和导航、大数据与人工智能、无线定位等。
- 刘建航: 男, 副教授, 研究方向为网络安全、智能传输、车载网络、无线网络等。

责任编辑: 马秀强