

基于压缩感知多址接入的网络通信隐蔽传输信道估计方法

江雍

(泉州医学高等专科学校, 福建 泉州 362000)

摘要: 由于隐蔽信道具有稀疏性,在对隐蔽传输信道估计时,可能会因缺乏对关键信息的有效提取而导致信道估计效果不佳,故基于压缩感知多址接入研究网络通信隐蔽传输信道估计方法。引入稀疏字典,通过对稀疏系数向量求解,提取出信道冲激响应中的关键信息。采用测量矩阵对信道冲激响应线性投影,得到用户的压缩感知值。结合正交匹配追踪法,以迭代的方式对测量矩阵中与当前残差最相关的列选择,实现对隐蔽传输信道估计。实验结果表明,采用所提方法对隐蔽传输信道进行估计时,误码率较低,具备较为理想的估计效果。

关键词: 压缩感知;多址接入;隐蔽信道;信道估计;误码率

中图分类号: TP393.03; TN911.72

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0155-04

Network communication covert transmission channel estimation method based on compressed sensing multiple access

JIANG Yong

(Quanzhou Medical College, Quanzhou 362000, China)

Abstract: Due to the sparse nature of covert channel, the estimation of covert transmission channel may be poor due to the lack of effective extraction of key information. Therefore, the estimation method of covert transmission channel of network communication based on compressed sensing multiple access is studied. By introducing sparse dictionary and solving sparse coefficient vector, the key information of channel impulse response is extracted. The measurement matrix is used to linearly project the channel impulse response, and the compressed sensing value of the user is obtained. The orthogonal matching tracking method is used to iteratively select the most relevant columns in the measurement matrix to estimate the covert transmission channel. The experimental results show that the proposed method has a lower bit error rate and a better estimation effect when it is used to estimate covert transmission channels.

Keywords: compressed sensing; multiple access; covert channel; channel estimation; bit error rate

0 引言

无线信道的复杂多变和资源有限性对网络通信的可靠性和安全性构成了严峻挑战,特别是在军事通信和隐私保护等敏感领域^[1]。隐蔽传输信道技术因此显得尤为重要,但传统的信道估计方法往往受限于大量的导频信号和数据样本,这在隐蔽通信场景下难以实现^[2]。

近年来,国内外学者在信道估计方面取得了不少研究进展。例如,文献[3]通过收集大量信道数据样本,利用统计学习方法对信道特性建模。并利用信号处理算法对接收到的信号处理,以估计出信道的状态信息。文献[4]采用最小均方差准则,通过优化算法对初始的信道估计值迭代调整。通过不断计算当前估计值与真实信道之间的误差,逐渐逼近真实的信道状态,从而得到较为准确的信道估计结果。文献[5]利用生成对抗网络(GAN)的强大能力来模拟和估计复杂的信道环境。在具体实现过程中,他们设计了一个包含生成器和判别器的网络结构,并通过

训练使生成器能够生成接近真实信道数据的样本。文献[6]提出了一种联合信道估计和信号恢复的方案。该方案将信道估计与信号解码过程相结合,通过迭代优化的方式,同时提高信道估计的精度和信号恢复的质量。但以上方法难以完全捕捉到信道的动态特性,导致信道估计精度受限。

针对上述问题,本文提出了一种基于压缩感知多址接入的网络通信隐蔽传输信道估计方法。该方法充分利用了压缩感知理论对稀疏信号的处理优势,结合多址接入技术的特点,实现了在有限资源下的高效信道估计。

1 网络通信隐蔽传输信道估计方法

1.1 网络通信隐蔽传输信道稀疏表达

网络通信中的信道冲激响应通常具有稀疏性,即大部分元素为零或接近于零,只有少数元素具有显著值。因此,通过对网络通信隐蔽传输信道稀疏表达,可以有效提取出信道冲激响应中的关键信息,从而为后续的信号处理以及分析提供便利。

在无线通信系统中,信道冲激响应通常表现为在时域

* 基金项目:福建省教育厅B类科技项目(JB10234)

收稿日期:2024-04-07

或频域上的少数非零值,这些非零值代表了信号在传输过程中受到的主要散射和反射^[7]。因此,本文将信道冲激响应看作是一个稀疏信号。设信道冲激响应为一个长度为 N 的向量 $\mathbf{h} = h_1, h_2, \dots, h_N$, 其中每个元素 h_i 表示在第 i 个时刻或频率点上的信道响应值。由于信道的稀疏性,大部分 h_i 的值将接近于零,只有少数几个值显著不为零。为了对信道冲激响应稀疏表达,本文引入一个稀疏基字典 Ψ 。这个字典包含了信道冲激响应可能具有的各种形状或模式,通常是通过先验知识或学习算法得到的^[8]。字典 Ψ 的大小为 $N \times M$, 其中 M 是字典中原子的数量,且通常 $M \geq N$ 。然后,可以将信道冲激响应向量 \mathbf{h}_i 表示为字典 Ψ 中原子的线性组合,其具体表达式为

$$\mathbf{h} = \Psi \cdot \boldsymbol{\alpha}_M \quad (1)$$

其中, $\boldsymbol{\alpha}_M$ 代表一个长度为 M 的稀疏系数向量。由于信道冲激响应的稀疏性, $\boldsymbol{\alpha}_M$ 中大部分元素的值将为零或接近于零,只有少数几个元素的值显著不为零。这些非零元素对应了字典 Ψ 中能够最好地表示信道冲激响应的原子。通过求解稀疏系数向量 $\boldsymbol{\alpha}_M$, 可以实现对信道冲激响应的稀疏表达^[9]。这一求解过程通常是一个优化问题,目标是在满足一定误差约束的条件下,使 $\boldsymbol{\alpha}_M$ 中的非零元素数量尽可能少。对此,本文构建出的稀疏系数向量求解的具体表达式为

$$\min_{\boldsymbol{\alpha}_M} \|\boldsymbol{\alpha}_M\|_0 \text{ subject } \|\mathbf{h}_i - \Psi \cdot \boldsymbol{\alpha}_M\|_2 \leq \varepsilon_i \quad (2)$$

其中, $\|\boldsymbol{\alpha}_M\|_0$ 代表稀疏系数向量中非零元素的数量,它衡量了稀疏系数向量的稀疏性。 $\|\cdot\|_2$ 代表欧几里得范数,用于衡量误差大小, ε_i 代表一个预设的误差阈值,用于控制重构误差的大小。

在求解出稀疏系数向量 $\boldsymbol{\alpha}_M$ 后,将 $\boldsymbol{\alpha}_M$ 的值代入到公式(1)中,即可完成对于通信信道的稀疏表达。在表达式中, \mathbf{h}_i 也具有稀疏性,因此只有少数元素保留了信道冲激响应的主要特征。

通过上述步骤即可完成对于网络通信隐蔽传输信道的系数表达,通过引入稀疏字典,通过对稀疏系数向量求解,得到信道冲激响应的稀疏表达形式,从而降低数据维度以及复杂度^[10]。

1.2 信道压缩感知测量值计算

在完成信道稀疏表达后,本文通过设计一个与信号稀疏性相匹配的测量矩阵,可以在远低于信号维度的测量次数下对各个用户的压缩感知测量值计算。对此,需要对测量矩阵构建^[11]。一个理想的测量矩阵应该能够保留原始信号的关键信息,同时使得重构算法能够有效地从压缩的测量值中恢复出原始信号。对此,本文以高斯矩阵作为基础矩阵,对于测量矩阵 Φ 中的每一个元素 Φ_{ij} , 本文从标准正态分布中随机抽取一个数作为矩阵参数值。标准正态分布的均值为0,方差为1。由于本文希望测量矩阵的列具有单位范数(即每一列的长度为1),因此在实际操作中,通常生成均值为0,方差为 $1/M$ 的高斯随机数,以确保

测量矩阵的列在统计意义上具有单位范数。矩阵的范围表达式为

$$\Phi_{ij} \sim N\left(0, \frac{1}{M}\right) \quad (3)$$

其中, $N\left(0, \frac{1}{M}\right)$ 代表均值为0,方差为 $1/M$ 的正态分布^[12]。通过不断重复上述步骤,直到测量矩阵中所有的元素都被填充,因此可以得到一个尺寸 $M \times N$ 为的高斯随机测量矩阵,具体矩阵表达式如下

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \dots & \Phi_{1N} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \dots & \Phi_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Phi_{M1} & \Phi_{M2} & \dots & \Phi_{MN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

虽然上述步骤中本文通过调整方差使得列在统计意义上具有单位范数,但在实际应用中,有时还需要对测量矩阵归一化处理,以确保每一列的确切范数为1^[13]。对此,本文通过将每一列除以其自身的欧几里得范数(即二范数)来实现,其具体归一化表达式为

$$\Phi_{\text{norm}, ij} = \frac{\Phi_{ij}}{\|\Phi_j\|_2} \quad (5)$$

其中, $\Phi_{\text{norm}, ij}$ 代表归一化处理后的测量矩阵中的元素, $\|\Phi_j\|_2$ 代表测量矩阵中第 j 列的二范数。通过上述流程,可以得到一个用于压缩感知的高斯随机测量矩阵。然后通过测量矩阵对信道冲激响应线性投影,从而得到压缩感知值。但在多址接入处理阶段,需要考虑多个用户同时访问信道的情况。

假设有 k 个用户,每个用户的信道冲激响应分别为 $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_k$ 。为了区分不同用户的信号,可以为每个用户分配一个独特的测量矩阵 \mathbf{h}_k , 其中 $k = 1, 2, \dots, K$ 。因此,对于每个用户,都可以得到一个压缩感知测量值 y_k , 其计算公式为

$$y_k = \mathbf{h}_k \Phi_{\text{norm}, ij} \quad (6)$$

其中, y_k 代表压缩感知测量值。

通过上述步骤,采用高斯矩阵作为信道的测量矩阵,并结合欧几里得范数对测量矩阵归一化处理,最后通过采用矩阵对信道冲激响应线性投影,从而得到用户的压缩感知值。

1.3 网络通信隐蔽传输信道估计

在得到各个用户的压缩感知测量值后,可以利用稀疏信号重构算法对信道冲激响应估计。对此,本文结合正交匹配追踪法,通过迭代选择测量矩阵中与当前残差最相关的列,对原始信号逐步逼近。

假设 r_t 代表当前估计值与压缩感知测量值 y_i 之间的差异,即残差,那么可以结合残差值,对测量矩阵中每一列的投影系数计算,具体计算公式为

$$c_j = \Phi_j^T r_{t-1} \quad (7)$$

其中, t 表示当前迭代次数, c_j 代表残差 r_{t-1} 与测量矩阵第

j 列的投影系数, 该值反映了该列与当前残差的相关性, Φ_j 代表测量矩阵中的第 j 列^[14]。然后找到投影系数所在最大列的索引值 j_i , 对索引集 I 更新, 具体表达式为

$$\begin{cases} j_i = \operatorname{argmax}_j |c_j| \\ I = I \cup \{j_i\} \end{cases} \quad (8)$$

最后利用索引集中对应的列构造出新的矩阵, 并结合最小二乘法对信道估计, 具体估计表达式为

$$x_i = \operatorname{argmax}_x \|y_i - \Phi_j x\|^2 \quad (9)$$

其中, Φ_j 代表由索引集中对应的列所构造出的子矩阵, x_i 代表网络通信隐蔽传输信号的估计结果。当迭代次数达到最大值 T 或残差 r_i 小于某个预设阈值时, 停止迭代^[15]。输出重构的信号 x_i 即可作为对原始信道冲激响应的估计值。

通过上述步骤即可完成对于网络通信隐蔽传输通道的有效估计, 结合正交匹配追踪法, 以迭代的方式对测量矩阵中与当前残差最相关的列选择, 从而不断逼近原始信号, 进而实现信道估计。将本节内容与上述提到的信道稀疏表达以及压缩感知测量等相关内容结合, 至此, 基于压缩感知多址接入的网络通信隐蔽传输信道估计完成。

2 实验论证

为了证明本文提出的基于压缩感知多址接入的网络通信隐蔽传输信道估计方法的实际估计效果优于常规的通信信道估计方法, 在完成方法设计部分后, 通过对比实验操作, 对本文方法的实际估计效果进行分析。

2.1 实验说明

为验证本文提出的信道估计方法在实际估计效果中的优越性, 本次实验选取了两组常规的通信信道估计方法作为对比对象, 分别为基于 OMMP 算法的通信信道估计方法, 以及基于路径时延的通信信道估计方法。通过构建实验平台, 采用三种信道估计方法对同一个仿真信道模拟估计, 对比不同方法的实际估计效果。

2.2 实验对象

本实验将构建一个仿真实验环境, 其中包括信号发生器、信道模拟器、接收器和数据处理单元。信号发生器生成具有不同调制方式和码率的信号, 以满足不同通信场景的需求。信道模拟器用于模拟真实环境中的通信信道, 包括加性噪声、多径效应、衰减等。接收器用于接收经过信道传输的信号, 对必要的信号进行了解调和操作。三个主要设备的连接方式以及硬件参数配置如图 1 所示。

通过采用上述硬件平台配置, 模拟出真实的信道环境。在信号发生器中设置信号参数, 生成测试信号并通过信道模拟器传输。接收器首先接收信号, 随后进行必要的信号处理和调操作。完成这些步骤后, 处理后的信号会被传输到数据处理单元进行进一步的处理。在数据处理单元中, 分别采用三种方法, 对接收到的信号信道估计。对此, 信号接收器所接收到的部分信号波形如图 2 所示。



图 1 信号发生器、信道模拟器、接收器的连接方式与参数配置

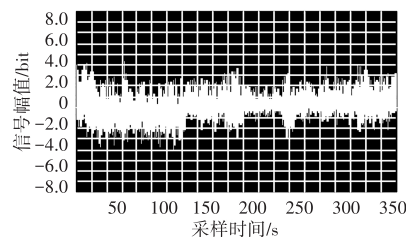


图 2 接收器接收到的部分信号波形图

在采用本文方法对真实信号信道估计时, 需要对本文算法的参数配置。对此, 本文设定误差阈值 ε_i 为 0.002, 稀疏系数向量的求解范围为 $[-1.24, 2.16]$, 残差设定阈值 r_i 为 0.08。待实验完成后, 对三种方法下的估计结果分析, 从而实现实验结果的有效对比。

2.3 估计效果对比

采用本文方法所得到的通信隐蔽传输信道估计结果如图 3 所示。

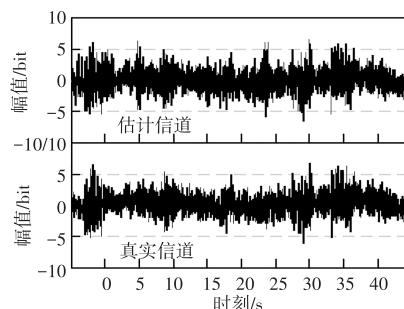


图 3 本文方法下的通信信道估计结果

通过上述实验结果可以看出, 本文方法可以针对网络通信隐蔽传输信道精准估计, 其估计结果与真实信道的波动情况较为接近。为提高实验结果的可靠性, 本次实验以不同信道估计方法的误码率作为实验衡量指标, 用于衡量不同方法的实际估计精度。误码率代表各个信道估计结果中, 误码所出现的频率。因此该值越低, 代表方法的估计精度越高, 所估计出的信道波动情况越接近于真实情况, 具体实验结果如表 1 所示。

通过上述实验结果可以看出, 在通信信道估计时, 不同方法的估计效果也有所不同。通过对比不同估计结果的误码率可以看出, 本文提出的基于压缩感知多址接入的

网络通信隐蔽传输信道估计方法在估计效果上明显优于两种常规的估计方法,误码出现频率更低。

表1 不同信道估计结果的误码率对比结果

迭代次数	本文方法	常规方法 A	常规方法 B
10	0.24	0.53	0.33
20	0.15	0.48	0.31
30	0.19	0.49	0.32
40	0.22	0.64	0.31
50	0.20	0.41	0.33
60	0.18	0.44	0.37
70	0.16	0.38	0.22
80	0.15	0.42	0.38
90	0.12	0.43	0.22
100	0.21	0.45	0.30
110	0.15	0.43	0.28
120	0.16	0.45	0.29
130	0.13	0.51	0.31
140	0.18	0.44	0.26
150	0.11	0.41	0.27

3 结束语

基于压缩感知多址接入的网络通信隐蔽传输信道估计方法具有重要的研究意义和应用价值。它不仅能够提升无线通信系统的性能和安全性,还能够为未来的隐蔽通信技术发展提供新的思路和方法。未来,本文将继续深入研究该方法,优化算法性能,拓展应用场景,为推动无线通信技术的持续发展贡献更多的力量。

参考文献

- [1] 刘阳, 杨蕾, 吴志强. 一种适用于海上通信的 OFDM 系统信道估计算法[J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(6): 201-207, 214.
- [2] 许方敏, 史文策, 冯涛, 等. 基于联合波束赋形的无人机辅助通信网络上行传输技术[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 871-880.
- [3] ZHENG B, YOU C, MEI W, et al. A survey on channel estimation and practical passive beamforming design for intelligent reflecting surface aided wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 1035-1071.
- [4] 邢娟, 李俊霞, 梁珍珍. 基于最小均方差的无线通信信道估计算法仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(3): 236-240.
- [5] 张欣怡, 江沸波, 彭于波, 等. H-ResGAN 在智能反射面辅助

通信系统中的信道估计[J]. 电波科学学报, 2023, 38(6): 1048-1056.

[6] WEI L, HUANG C, GUO Q, et al. Joint channel estimation and signal recovery for RIS-empowered multiuser communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(7): 4640-4655.

[7] 隆峻, 陈佐瓚. 基于深度学习的信息传输过程不良数据辨识模型[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(5): 89-91, 169.

[8] 李贵勇, 杜一舟, 王丹. 可重构智能表面辅助的多用户通信宽带信道估计[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(7): 2443-2450.

[9] 张天魁, 李亚楠, 沈鸿. 无人机蜂群通信的虚拟大规模 MIMO 信道估计算法[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 46-52.

[10] 方璟. 基于压缩感知的配电网电压暂降故障节点检测[J]. 电子设计工程, 2022, 30(7): 135-138, 143.

[11] 齐永磊, 陈西宏, 袁迪喆. SC-FDE 系统中基于 UW 的联合信道估计均衡算法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(10): 3258-3265.

[12] 蒋占军, 刘庆达, 张钺, 等. 高速移动通信系统中 OTFS 分数多普勒信道估计加窗研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(2): 646-653.

[13] SHU Z, DU H B, ZHU X Y, et al. Research on the control strategies of data flow transmission paths for MPTCP-based communication networks[J]. PeerJ Computer Science, 2023, 9(2): 1716.

[14] 甘润东, 王策, 李洵. 基于迁移学习的网络传输异构数据一致性校验系统[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(1): 82-85, 92.

[15] WU JING, JIN CHENG, WANG ZIWU. Linear anti-interference algorithm for digital signal transmission in fiber optic communication networks based on link analysis[J]. Scalable Computing: Practice and Experience, 2024, 25(2): 920-927.

作者简介: 江雍(1983—), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 计算机、网络通信。

(上接第 105 页)

[9] 曾凌峰, 林朝哲, 黄建理, 等. 光纤分立式多点局部放电检测与定位技术[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 1125-1132.

[10] 邱虎, 杨旭, 罗传仙, 等. GIS 间歇性局部放电泄漏电磁波检测传感器设计研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(9): 202-209.

[11] 季坤, 张晨晨, 丁国成, 等. 粒子群优化算法在电力变压器声纹识别中的应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2023(6): 643-648.

[12] 李文霞, 杜宇君, 王悦, 等. 基于 CNN 的废旧纺织品在线 NIR 高效识别与自动分选技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(7): 2139-2145.

[13] 兰志成, 吴挺兴, 吴济, 等. 基于 GPS-PTK 技术的变电站故障高精度定位方法[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(2): 67-70, 80.

作者简介: 李强(1981—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 变电安装技术与应用、电力建设现场施工管理等。