

基于压缩信道感知的超宽带混合信道估计

龚 辉

(上海大学 通信与信息工程学院 上海 200072)

摘要: 超宽带信道通常存在多径稀疏特性,因而可采用压缩信道感知技术。然而,在富散射环境中,多障碍物的散射特性通常会导致超宽带信道呈现出一种稀疏和稠密混合模式。因此,在富散射环境下,基于阶段正交匹配追踪压缩感知算法,该文提出了一种基于阶段正交匹配追踪压缩感知与 MMSE 的联合压缩感知超宽带混合信道估计算法。该算法克服了基于多径分量稀疏假设而忽视散射分量的超宽带信道特性,增强了超宽带混合信道估计的精确性。仿真结果表明,所提出的方法能够对于包含富散射分量的超宽带混合信道获得更小的估计误差。

关键词: 超宽带系统;信道估计;混合信道;压缩信道感知

中图分类号: TN911.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.105

CS-based channel estimation methods for UWB hybrid channel

Gong Hui

(School of communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Because of the UWB (Ultra-wideband) channel multipath sparsity, its estimation is based on sparse assumption. It usually adopts the compression channel sensing technology. However, in the indoor environment, scattering which is caused by multi obstacle environment often leads to ultra wideband channel presents a sparse and dense hybrid mode. Therefore, in consideration of the scattering characteristics of the case, based on the STOMP (stagewise orthogonal matching pursuit) compressed sensing algorithm, this paper proposes a novel channel estimation method which called STOMP-MMSE. The algorithm overcomes the assumption based on sparse which ignore the scattering component of the channel, improving the accuracy of channel estimation. The simulation results show that the method proposed can help ultra wideband hybrid channel which contains scattering component to obtain the estimation error smaller.

Keywords: UWB system; channel estimation; hybrid channel; compressed sensing

1 引言

超宽带 (ultra-wideband, UWB) 通信系统具有较高的抗多径衰落能力,且其功耗和成本较低,能与现有窄带通信系统共存。不同于窄带通信系统,UWB 信号在时域上表现为一种窄带脉冲的形式,依据奈奎斯特采样定理,UWB 系统需要极高的采样频率,因此其数据量较大,信道估计算法实时性差^[1-3]。其次,对 UWB 信道的研究发现 UWB 系统的接收多径分量比较丰富^[4](大约为 100~400 条),但大部分的多径能量又近似为零,即信道矩阵呈现出一种稀疏结构,因此可以使用压缩感知算法对其进行数据压缩,从而降低信道估计数据处理量。然而最新的研究表明,在富散射环境中,由于信道

散射分量丰富,UWB 信道矩阵不仅呈现多径传输的稀疏结构特性,同时还呈现富散射传输的稠密结构特性,因而是一种稀疏和稠密混合的信道结构^[5]。由此可见,提供高效、精确的 UWB 混合信道估计方法对拓展 UWB 系统的应用范围已变得十分重要。

针对 UWB 信道的稀疏特性以及压缩感知算法的特点,众多学者对 UWB 信道估计进行了广泛的研究。Guozhu Li 提出了基于分段式 UWB 压缩信道估计方法^[6],在已知 UWB 信道先验信息的情况下,改善了 OMP 算法原子选择率差的问题,增强了在噪声环境中对于 UWB 信道估计的稳定性,减少了 UWB 接收机的误码率。Barbieri 运用了两种压缩感知算法,匹配追踪 (MP) 及基去噪追踪 (BPDN) 算法对于 UWB 系统进行

了信道估计和信号检测,在大噪声环境下,将两种算法对于 UWB 信道的估计的性能做了详细的对比^[7],其结果表明运用 BPDN 算法进行信道估计对于 UWB 系统的误码率性能有显著提高。而针对稀疏度估计困难的问题,Depeng Yang 等人提出的基于贝叶斯估计的 UWB 信道估计,解决了过度依赖稀疏度进行估计的问题^[8]。以上的算法主要研究的对象是基于稀疏假设的信道,但其没有解决富散射环境下 UWB 信道估计问题,而仅采用压缩感知算法进行富散射环境下 UWB 信道估计会带来较大的估计误差,从而影响系统的性能。

本文针对 UWB 系统在富散射环境中的信道结构特征,提出了基于压缩感知与 MMSE 的联合压缩感知超宽带混合信道估计方法。该方法采用阶段正交匹配追踪(stagewise orthogonal matching pursuit, STOMP)重构算法对信道中的稀疏结构进行估计,对于信道中的稠密结构,则采用 MMSE 算法进行估计。由于散射引起的稠密信道结构,相对于单一的稀疏信道估计方法,本文所采取的方法能得到更小的估计误差。

2 UWB 混合信道模型

对于具有多径传输特性的 UWB 信道,目前常用的信道模型为 Salen-Valenzuela 模型^[9],该模型主要采用多径成簇分布现象来描述信道。其信道冲击响应为:

$$h(i) = \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \beta_{k,l} \delta(i - T_l - \tau_{k,l}) \quad (1)$$

式中: L 为多径信道簇的数目, K 为每簇中多径的数目, $\beta_{k,l}$ 为第 l 簇中第 k 径信道的衰减因子, $\delta(i)$ 为 Dirac 序列, T_l 是第 l 簇中第 1 径的到达时间, $\tau_{k,l}$ 是第 l 簇中第 k 径相对于第 1 径的时延。该信道中,由于信道衰减因子 $\beta_{k,l}$ 离散性较大,使得经大部分路径到达接收端的信号能量近似为零。因此,将该信道处理成稀疏信道模型后,采用压缩感知信道估计算法可大幅降低信道估计的算法复杂度。

然而,上述信道模型并未考虑信道传输过程中的富散射特性。美国南加州大学的研究人员通过对室内富散射环境下 UWB 信道的测量,提出了包含富散射成分的信道模型。

研究显示该信道模型不仅包含了稀疏信道结构,同时还包含了富散射环境引入的稠密信道结构。其信道传递函数可简化为^[10]:

$$\mathbf{h} = \mathbf{a}_s \cdot \mathbf{c}_s + \mathbf{h}_d \quad (2)$$

式中: \cdot 运算为对应位置元素乘积, $\mathbf{a}_s \in \{0,1\}^L$ 为满足伯努利分布的多径选择因子,即 $P(\mathbf{a}_s = 1) = q, q \ll 1$,当传输路径上的能量大于某阈值,令其为 1,而小于该阈值,则为 0; \mathbf{c}_s 为信道衰落因子, $\mathbf{h}_s = \mathbf{a}_s \cdot \mathbf{c}_s$ 即为 UWB 稀疏信道模型, $\mathbf{h}_s \sim N(0, \mathbf{\Lambda}_s)$ 为均值为 0,方差为 $\mathbf{\Lambda}_s$ 高斯分布, $\mathbf{\Lambda}_s$

是由 \mathbf{h}_s 的功率延迟因子^[11]构成的对角阵,即 $E[\mathbf{c}_s \mathbf{c}_s^*] = \mathbf{\Lambda}_s$; \mathbf{h}_d 表示富散射所引起的散射信道元素,其中 $\mathbf{h}_d \sim N(0, \mathbf{\Lambda}_d)$, $\mathbf{\Lambda}_d$ 是由 \mathbf{h}_d 的功率延迟因子构成的对角阵,为了简化分析,假设接收端 $\mathbf{\Lambda}_d$ 为已知。

设 $x = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]$, 为导频序列,在接收端能够收到的单用户发送的由发送导频序列构成的矩阵 \mathbf{x} ^[12], 假设 $x = [x(-1), x(-2), \dots, x(-(L-1))]$ 为系统之前正常接收到的信号,则接收信号矢量为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}\mathbf{h} + \mathbf{w} = \mathbf{x}\mathbf{h}_s + \mathbf{x}\mathbf{h}_d + \mathbf{w} \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x(0) & x(-1) & \cdots & x(-L+1) \\ x(1) & x(0) & \cdots & x(-L+2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x(N-1) & x(N-2) & \cdots & x(N-L) \end{bmatrix},$$

$\mathbf{y} = [y(0), y(1), \dots, y(N-1)]^T, \mathbf{h} = [h(0), h(1), \dots, h(L-1)]^T, \mathbf{w} \sim N(0, \sigma_w)$ 为白高斯噪声矢量。

目前对于 UWB 信道估计都是假设信道稀疏度已知情况下进行的,一般重构迭代次数大于等于稀疏信道数量,其认为在完成 K 次迭代后已经重构出了 K 条重要多径信道,完成了信道估计任务。而对于上述具有富散射特性的 UWB 信道,假设采用基于稀疏信道数量作为迭代条件,当迭代停止时,只能估计出大部分稀疏信道分量,会忽视大部分散射分量 \mathbf{h}_d , 从而引起较大的估计误差。为了精确的对该混合信道进行估计,本文提出了一种 STOMP 与 MMSE 结合的算法进行信道估计。

由于在 UWB 混合信道模型中,富散射环境所产生的散射分量呈现稠密结构,其信道增益相对于稀疏分量较小,因此本文采用分块估计的思想,对于整个多径信道采用阈值分块的思想进行分块估计。同时,为了能在稀疏度未知情况下对于稀疏信道元素进行估计。本文采用了 STOMP 算法对于稀疏信道元素进行估计,STOMP 信道估计算法的特点是其不需要利用稀疏多径信道数作为信道估计的迭代条件,而采用了阶段数(通常为 10 个阶段)作为迭代停止条件。另外,通过 STOMP 算法还可以精确记录稀疏信道的位置,利用其能确定稀疏元素位置的特点,将稀疏元素与散射元素进行分离,而对于大量信道增益较小的散射元素,为了增加整个信道估计的估计精度,则采用 MMSE 算法进行估计。

3 基于 STOMP+MMSE 的混合信道估计算法

对于上述的混合信道模型,本文所采用的是分块估计思想,对于接收端的观测信号:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}\mathbf{h} + \mathbf{w} = \mathbf{x}\mathbf{h}_s + \mathbf{x}\mathbf{h}_d + \mathbf{w} \quad (4)$$

针对 UWB 混合信道的富散射特性,本文提出的 STOMP+MMSE 算法如图 1 所示。

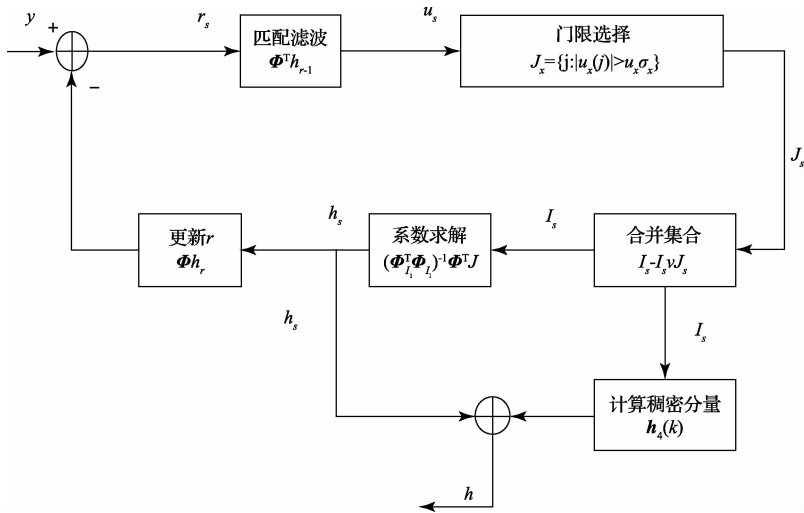


图 1 STOMP-MMSE 算法

其算法的基本思想是利用接收端的导频序列构成的转置矩阵 $\Phi = \mathbf{x}^T$ 对于观测信号的残差值 $\mathbf{r}_s = \mathbf{y} - \Phi \mathbf{h}_s$ (首次循环时 $\mathbf{r}_1 = \mathbf{y}$) 进行匹配滤波:

$$\mathbf{u} = \Phi \mathbf{r}_s = \Phi (\mathbf{x} \mathbf{h}_s + \mathbf{x} \mathbf{h}_d + \mathbf{w}) \quad (5)$$

由于稀疏元素幅值较大,而散射元素幅值较小,利用阈值将信道中的稀疏元素与稠密元素分离,同时将稀疏元素的位置信息记录在集合 I_s 中,对于稀疏信道元素 h_s 进行估计:

$$(\mathbf{h}_s)_{I_s} = (\Phi_{I_s}^T \Phi_{I_s})^{-1} \Phi_{I_s}^T \mathbf{y} \quad (6)$$

并使用残差值 $\mathbf{r}_s = \mathbf{y} - \Phi \mathbf{h}_s$, 将已经估计完成的信道元素从待估计信道中去掉。

而对于散射信道元素,采用 MMSE 估计算法进行估计:

$$\mathbf{h}_d = \mathbf{R}_{h_s} \mathbf{R}_{h_d} (\mathbf{R}_{h_s} \mathbf{R}_{h_d} + (\mathbf{X} \mathbf{X}^T)^{-1} \sigma^2)^{-1} (1 - I_s) \mathbf{h}_{LS} = \frac{\mathbf{S}_{k,k} \mathbf{R}_{h_s} \mathbf{R}_{h_d}}{1 + \mathbf{R}_{h_s} \mathbf{R}_{h_d} \mathbf{S}_{k,k}} (1 - I_s) \mathbf{h}_{LS} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{R}_{h_s} \mathbf{R}_{h_d} = P_d(k)$, I_s 为稀疏元素位置, Φ_{I_s} 为稀疏元素位置所对应的导频矩阵的列向量, $\mathbf{S}_{k,k} = \frac{\mathbf{X}^T \mathbf{X}}{\sigma_w^2}$ 。

算法的具体执行过程如下:

输入: 观测向量 \mathbf{y} , 恢复矩阵 Φ , 最大循环次数(阶段数) $S = 10$;

初始化: $\mathbf{h}_0 = 0, \mathbf{r}_0 = \mathbf{y}, s = 1$; 迭代计数器初值 $i = 1$;

1) 计算信号的相关向量 $\mathbf{u}_s = \Phi^T \mathbf{r}_{s-1}$; 利用阈值选取与残差值最大相关的列的位置作为索引集: $J_s = \{j: |u_x(j)| > t_s \sigma_x\}, 2 \leq t_s \leq 3$;

2) 更新支撑集 $I_s = I_s \cup J_s$;

3) 解最小二乘问题, 得到稀疏信号的估计值 $(\mathbf{h}_s)_{I_s} = (\Phi_{I_s}^T \Phi_{I_s})^{-1} \Phi_{I_s}^T \mathbf{y}$;

4) 更新残差值: $\mathbf{r}_s = \mathbf{y} - \Phi \mathbf{h}_s$;

5) 当满足迭代停止条件: 残差值 $i > S$, 完成稀疏信道

估计。

否则, $i = i + 1$, 返回 1)。

6) 利用 MMSE 估计算法计算稠密元素:

$$\mathbf{h}_d(k) = \frac{S_{k,k} P_d(k)}{1 + S_{k,k} P_d(k)} (1 - I_s(k)) \mathbf{h}_{LS}(k);$$

7) 输出: 输出重构信号 $\mathbf{h} = \mathbf{h}_s + \mathbf{h}_d$ 。

对于本文提出的 STOMP+MMSE 算法, 对其进行了复杂度分析。假设接收端由导频构成的矩阵 \mathbf{x} 为 $n \times N$ 维的压缩矩阵 ($n < N$), 观测信号 \mathbf{y} 为 $n \times 1$ 维列向量。则其复杂度分析如表 1 所示。

表 1 算法复杂度分析

算法	算法复杂度
STOMP ^[13]	SvnN+O(N)
LS	O(nN)
STOMP+MMSE	SvnN+O(nN ²)

表 1 中, STOMP 算法在每个阶段中, 首先对于残差信号进行匹配滤波, 需要 nN 次循环, 然后其采用了门限阈值进行原子集合的获取和更新, 这个过程需要至多 $2N$ 次额外的循环, 而对于信号的重构, 其复杂度为 $v n N + O(nN)$, v 为信号重构迭代次数, 通常为 10, S 为算法总的阶段数, 而对于散射元素的估计, 采用了 MMSE 信道估计, 其复杂度为 $O(nN^2)$, 因此 STOMP+MMSE 算法的复杂度如表 1 所示。相对于 LS 算法和 STOMP 算法, 本文所提出的 STOMP+MMSE 算法由于需要对于稠密信道元素求 MMSE 估计, 其复杂度较高, 但是从仿真结果可以看出其估计精度与 STOMP 对比有较大改善。

对于信道重构的估计误差, 定义信道的均方误差 (MSE) 为:

$$MSE = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} E[|\hat{h}(k) - h(k)|^2] \quad (8)$$

4 仿真结果

在对于混合信道估计的仿真中,采用 $N = 60, L = 138$ 的发送序列矩阵, $a_s \in \{0, 1\}^L$ 为伯努利分布,其伯努利参数 $q = 0.1$,即信道的稀疏度为 0.1,根据文献[8]的混合信道模型,稀疏元素 c_s 的 PDP 为指数分布, $\Lambda_s(k, k) = P_s e^{-\omega k}$ 。其中, $\omega = 0.05$ 为指数衰减因子, $P_s = 1$ 为稀疏信道因子。为了更好的控制信道的能量分布,将信道的稠密分量 h_d 的 PDP 设为 $\Lambda_d(k, k) = \beta P_s e^{-\omega k}$,其中, $\beta = 0.1$ 。

如图 2 所示,给出了在相同的 SNR 以及稀疏度 ($q = 0.1$) 情况下,本文的 STOMP+MMSE 算法与压缩感知算法 STOMP 的对比,在 SNR 为 0 dB 时,STOMP 算法的 MSE 为 -2.24 dB,而 STOMP+MMSE 算法的 MSE 降低了 5 dB;在 SNR 为 10 dB 时,STOMP+MMSE 算法的 MSE 与 LS 算法所得结果接近,由于只采用 STOMP 算法重构信道时,其更加关注信道中能量较大的多径信道,即稀疏信道,而忽略了由散射所引起的稠密信道,因此会产生较大的估计误差,而本文所提出的 STOMP+MMSE 算法能够取得更小的估计误差,达到更好的估计性能。

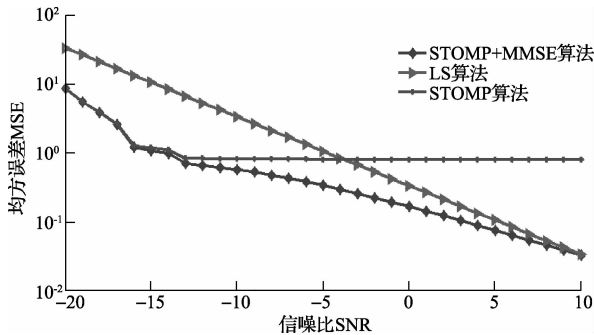


图 2 STOMP+MMSE 算法与 LS 算法以及 STOMP 算法的比较

图 3 给出了 SNR 为 5,信道的稀疏度为 0.1 时,采用 STOMP+MMSE 算法的信道估计结果。其压缩矩阵采用 $M = 80, N = 158$ 的压缩矩阵进行压缩感知,多径信道长度

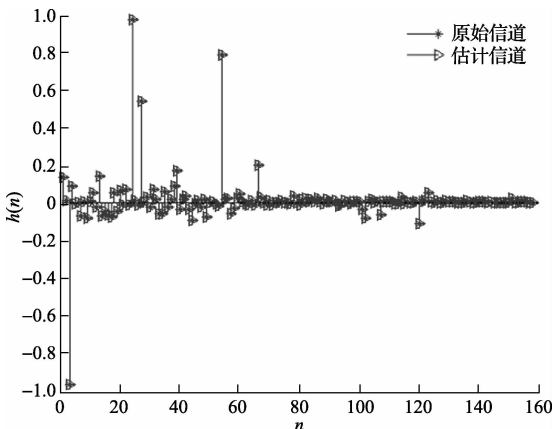


图 3 信道仿真结果

$L = 158, \beta = 0.1, \omega = 0.05$ 。从图 3 中可以看出,本文所提出的 STOMP+MMSE 算法能够以较高的精度去重构超宽带混合信道。

5 结论

针对 UWB 信道稀疏和稠密的混合特性,在考虑到富散射信道元素带来的稠密特性的影响下,本文提出了一种更加精细的 STOMP+MMSE 信道估计方法,该方法利用分块估计的思想,对于稀疏和稠密元素进行处理,克服了单一使用压缩感知技术所带来的问题,采用该方法能够对于 UWB 混合信道中的稠密以及稀疏成分进行精确估计,因而能够取得更小的估计误差。

参考文献

- [1] 许志猛,杨爱东,余轮.一种 TR-UWB 信号离散功率谱分量抑制技术[J].电子测量和仪器学报,2013,27(2):135-139.
- [2] 徐湛.基于稀疏小波变换的超宽带低信噪比信号检测算法[J].仪器仪表学报,2013,34(4):825-829.
- [3] 卢建春,邹艳忠,郑良泉.正弦高斯脉冲超宽带系统信道容量研究[J].电子测量技术,2012,35(1):55-57.
- [4] YANG L, GIANNAKIS G B. Ultra-wide band communications: an idea whose time has come[J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 2004, 21(6): 26-54.
- [5] SANTOS T, TUFVESSON F, MOLISCH A F. Modeling the ultra-wideband outdoor channel: Model specification and validation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(6): 1987-1997.
- [6] LI G ZH, WANG D Q, ZHANG Z K. Segmented compressed sensing scheme for UWB channel estimation [C]. Information and Communications Technologies (ICT 2014).
- [7] BARBIERI A, PANCALDI F. Compressed channel estimation and data detection algorithms for IR-UWB [C]. 2011 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB), 2011: 360-364.
- [8] YANG D, LI H SH, PETERSON G D. Message passing bayesian compressed sensing algorithm [C]. in Conf. on Information Sciences and Systems (CISS), Princeton University, NJ, March, 2010.
- [9] 彭丽,孙彦景,钱建生,等.超宽带室内修正 S-V 信道模型的仿真与分析[J].计算机工程与设计,2009,30(3):582-587.
- [10] MICHELUSI N, MITRA U, MOLISCH A F, et al. UWB sparse/diffuse channels, part I: channel models and bayesian estimators [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(10): 5307-5319.
- [11] GHASSEMZADEH S S, GREENSTEIN L J, SVEINSSON T, et al. UWB delay profile models for

- residential and commercial indoor environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(4): 1235-1244.
- [12] HAUPT J, BAJWA W U, RAZ G, et al. Toeplitz compressed sensing matrices with applications to sparse channel estimation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(11): 5862-5875.
- [13] DONOHO D L, TSAIG Y, DRORI I, et al. Sparse solution of underdetermined systems of linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(2): 1094-1121.

作者简介

龚辉, 1989 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为超宽带信道估计、无线信道估计等。

E-mail: andy5071@126.com

(上接第 131 页)

- [6] HASSON D, DRAKA, YANG Q F, et al. Effect of axial dispersion on the concentration polarization level in spiral wound modules[J]. Desalination, 2006, 199(1-3): 451-453.
- [7] HASSON D, DRAK A, KOMLOS C, et al. Detection of fouling on RO modules by residence time distribution analyses[J]. Desalination, 2007, 204(1-3): 132-144.
- [8] 杨庆峰. 卷式反渗透膜器浓水侧流道缺诊断[J]. 化工学报, 2006, 57(6): 1319-1322.
- [9] 王树东, 何明. LabVIEW 在数据采集系统中的应用研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6): 103-106.
- [10] 李红刚, 张素萍. 基于单片机和 LabVIEW 的多路数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 62-67.
- [11] 黄豪彩, 杨灿军, 陈道华, 等. 基于 LabVIEW 的深海气密采水器测控系统[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1): 40-45.

作者简介

刘锡文, 硕士研究生, 工程师。主要研究方向为反渗透海水淡化技术。

E-mail: xw_l@hotmail.com