

一种基于强径选择的联合信道估计算法

宋晓勤^{①②} 胡爱群^① 李克^②

^①(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

^②(鼎桥通信技术有限公司 北京 100102)

摘要: 用于 TD-SCDMA 系统的高精度联合多小区信道估计算法, 存在运算复杂度高、可联合估计的干扰用户少等缺点。该文针对信道估计结果有强、弱径之分的特点, 变选择强干扰用户为选择强径, 提出基于强径选择的联合信道估计算法。从算法复杂度和误码率性能的分析可以看出: 新算法不仅将复杂度降低了一半, 而且在误码率性能上还略有提升。

关键词: TD-SCDMA; 联合检测; 信道估计; 最小均方误差

中图分类号: TN914.5, TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0410-04

A Joint Channel Estimation Algorithm Based on Strong Paths Selection

Song Xiao-qin^{①②} Hu Ai-qun^① Li Ke^②

^①(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^②(TD-Tech Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: The higher complexity and the less number of the joint estimation interfering users are the main disadvantages of the high accuracy joint multi-cell channel estimation algorithm. A strong paths selection based joint channel estimation algorithm is proposed by fully considering the difference between the strong paths and weak paths in the channel estimation results. It is shown from the complexity and Bit Error Rate (BER) performance analysis, the proposed algorithm can reduce 50% complexity algorithm and improve the BER performance slightly.

Key words: TD-SCDMA; Joint detection; Channel estimation; MMSE

1 引言

消除邻区干扰是解决 TD-SCDMA 系统同频组网的重要课题。多小区联合检测算法^[1]可有效消除邻小区用户的干扰, 其核心思想是将本小区接入用户和邻小区强干扰用户同时纳入联合检测的系统矩阵, 进行多个小区用户的联合检测。

多小区联合检测算法要求对本小区激活用户和邻小区强干扰用户进行信道估计。将传统的用于单小区的 Steiner 信道估计算法^[2]扩展到对单个邻小区用户进行信道估计时, 由于本小区和其他邻区的用户的干扰功率都作为噪声来处理, 使得估计精度过低, 而无法应用。为了提高信道估计精度, 提出了将本小区激活用户和邻小区强干扰用户都纳入信道估计的系统矩阵, 同时得到它们的信道冲激响应(CIR)的联合多小区信道估计算法^[3]。该算法基于最小均方误差(MMSE)准则。由于降低了信道估计中的噪声功率, 故有效地提升了系统性能。

然而, 联合多小区信道估计算法还存在以下缺点: (1) 算法运算复杂度较大。由于改变了信道估计矩阵的结构, 失去了原有矩阵循环移位的 Toeplitz 特性, 故不能采用基于 FFT/IFFT 的 Steiner 简化算法^[2]。联合多小区信道估计算法在经过 Cholesky 分解等处理后, 算法的复杂度相比于扩展到多个邻区的 Steiner 算法提高了约 2.7 倍, 即便每隔 5 个子帧选择一次强干扰用户, 算法的复杂度仍提高了 1.8 倍。(2) 当本小区内的用户满负荷工作, 即达到系统所允许的 8 个最大激活用户数时, 所有用户 CIR 的总长度已经占用了 midamble 码的所有偏移。此时, 联合多小区信道估计算法无法再引入相邻小区中的强干扰用户信号, 联合多小区信道估计退化为本小区信道估计。此外, 无论是对于本小区内用户还是相邻小区用户, 其多径信号都有强径信号和弱径信号之分。在相邻小区中未被选中参加多小区空时联合处理的(总的信号功率相对较低的干扰用户)中, 也有可能存在强径信号。这些强径信号比选中用户的弱径信号具有更高的功率。而这部分干扰在现有的联合多小区信道估计算法中是作为噪声来考虑的。因此, 本文提出了基于强径选择的联合信

2007-08-15 收到, 2008-04-14 改回

鼎桥通信技术有限公司和国家 863 计划项目(2006AA01Z268)

资助课题

道估计算法:先通过在本小区激活用户和相邻小区的强干扰用户中选出一条最强径,再根据选取门限和系统剩余资源从剩余的多径信号中选择信号较强的强径信号,然后再利用所选择的本小区和相邻小区用户的强径信号进行联合信道估计。由于信道估计矩阵维数的降低,极大地减少了计算复杂度。又由于有效地包含了更多强径信号,考虑的干扰能量更集中,因而有效降低了干扰。

全文分为以下几部分:第2节简要介绍现有的联合多小区信道估计算法;第3节具体阐述新提出的基于强径选择的联合信道估计算法的原理;第4节对两种算法的复杂度和性能进行比较;最后是结束语。

2 联合多小区信道估计算法

在 TD-SCDMA 物理层主时隙的脉冲结构^[4]包括两个 352chips 的数据域、一个 144chips 的中间训练序列(midamble 码)和一个 16chips 的保护带。其中, midamble 码是接收端已知的码序列,可用于信道估计。

文献[3]中提出的联合多小区信道估计算法,首先需要在邻区中选择强干扰用户,然后将本小区激活用户和邻区强干扰用户的 midamble 码共同组成信道估计的系统矩阵,最后用 MMSE 准则进行信道估计。

2.1 强干扰用户的选择

相邻小区用户的 CIR 初步估计按照各个相邻小区分别进行。邻区 i 中第 j 个可能用户的 midamble 码可表示为

$$\mathbf{m}_i^{(j)} = [m_{i1}^{(j)}, m_{i2}^{(j)}, \dots, m_{iW+L}^{(j)}]^T \quad (1)$$

W 为信道冲激响应的长度, L 为用于信道估计的 midamble 码的长度。这两个参数的取值对于所有用户都是相同的。 $[\cdot]^T$ 为转置运算。

在 TD-SCDMA 系统设计时,一个小区中所有可能的用户所用的 midamble 码对应的矩阵 $\mathbf{G}_i^{(j)}$, 按照从用户 1 到小区内同一时隙所允许的最大用户数 K_m 顺序依次排列后,组成的 $L \times K_m W$ 维矩阵 \mathbf{G}_i :

$$\mathbf{G}_i = [\mathbf{G}_i^{(1)}, \mathbf{G}_i^{(2)}, \dots, \mathbf{G}_i^{(K_m)}] \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{G}_i^{(j)} = \begin{pmatrix} m_{iW+1}^{(j)} & m_{i1}^{(j)} & \dots & m_{i2}^{(j)} \\ m_{iW+2}^{(j)} & m_{iW+1}^{(j)} & \dots & m_{i3}^{(j)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{iW+L}^{(j)} & m_{iW+L-1}^{(j)} & \dots & m_{iL+1}^{(j)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

选择合适的参数,如 $W = 16$, $K_m = 8$, $L = 128$, 使得矩阵 \mathbf{G}_i 为方阵,又因为矩阵 \mathbf{G}_i 满足循环移位的 Toeplitz 特性,故在接收天线 A_m 上,小区 i 所有 K_m 个可能用户的信道冲激响应可以采用基于 FFT/IFFT 的 Steiner 简化算法^[2]来估计:

$$\hat{\mathbf{h}}_i^{(A_m)} = \text{IDFT}(\mathbf{A}_i^{-1} \text{DFT}(\mathbf{e}_{\text{mid}}^{(A_m)})) \quad (4)$$

其中 $\mathbf{e}_{\text{mid}}^{(A_m)}$ 为天线 A_m 所接收到的中间训练序列, \mathbf{A}_i 是对角阵,第 l 个对角线元素 λ_{il} 为矩阵 \mathbf{G}_i 中第一列元素 \mathbf{g}_i 的 DFT 的第 l 个分量:

$$\lambda_{il} = (\text{DFT}(\mathbf{g}_i))_l, \quad l = 1, \dots, L \quad (5)$$

得到了各个邻区用户的 CIR 初步估计结果,将它们按照能量进行排序。

2.2 联合多小区信道估计系统矩阵的构成

对各个邻区用户的 CIR 初步估计中,由于在对某个小区的 CIR 进行估计时,其他小区用户的信号都作为噪声来处理的,噪声和干扰的总功率较大,因此会影响信道估计的准确性。若强干扰用户分布在多个邻小区时,对于邻小区用户信道估计的准确性更差。

改变信道估计矩阵的结构,将本小区 K_0 个接入用户和从邻小区中选出的 K_1 个强干扰用户对应的 midamble 码所组成的矩阵 $\mathbf{M}_0^{(k)}$ 排列成矩阵 \mathbf{G} ,

$$\mathbf{G} = [\mathbf{M}_0^{(1)}, \dots, \mathbf{M}_0^{(K_0)}, \dots, \mathbf{M}_0^{(K_0+K_1)}] \quad (6)$$

2.3 MMSE 准则进行信道估计

重新定义信道估计矩阵 \mathbf{G} 后,基于 MMSE 准则^[5,6]将本小区活动用户和邻小区强干扰用户的 CIR 联合估计,接收天线 A_m 上各个用户的 CIR 为

$$\hat{\mathbf{h}}^{(A_m)} = (\mathbf{G}^H \mathbf{G} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^H \mathbf{e}_{\text{mid}}^{(A_m)} \quad (7)$$

其中 $(\cdot)^H$ 表示共轭转置运算,

$$\hat{\mathbf{h}}^{(A_m)} = [\hat{\mathbf{h}}^{(1, A_m)T}, \dots, \hat{\mathbf{h}}^{(K_0, A_m)T}, \dots, \hat{\mathbf{h}}^{(K_0+K_1, A_m)T}]^T \quad (8)$$

式(7)得到的结果还需要进行降噪处理^[7],即设置一个噪声门限,将低于噪声门限的分量置为零,以降低噪声,提高估计精度。噪声门限的设定本文采用噪声功率 σ^2 的两倍。

3 选择强径的联合信道估计算法原理

选择强径的联合信道估计算法的基本思想是:首先对本小区和各个相邻小区进行独立的信道估计,得到粗略的信道估计结果。然后分别对本小区和所有邻小区的用户进行强径信号的选择。根据所选择的强径信号产生多小区联合信道估计矩阵 \mathbf{G}_r , 最后用 MMSE 准则进行联合信道估计。选择强径的联合信道估计算法的原理如图 1 所示。

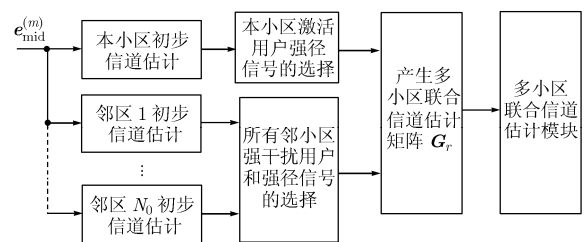


图1 选择强径的联合信道估计算法

3.1 各小区初步信道估计

各小区初步信道估计模块中, 信道估计的方法和第2节中介绍的相邻小区用户的 CIR 初步估计相同, 利用式(4)进行估计。各个小区的信道估计是独立进行的。需要注意的是, 由于要对本小区用户进行强径选择, 因此也需要用式(4)对本小区的用户进行初步的信道估计。

3.2 本小区激活用户强径信号选择模块

在本小区独立信道估计中所得到的是本小区所有可能用户的信道冲激响应。基站确知本小区的激活用户, 因此, 在强径信号选择时, 只选择本小区激活用户中的强径信号。

强径信号的选择过程分成两步:

首先, 计算本小区激活用户每个 CIR 分量的功率。假定不同接收天线上对应于同一用户的信道 CIR 统计特性都是相同的, 将 M 根天线对应多径的平均功率作为每个多径的功率:

$$\overline{P_{0j}^{(k)}} = \frac{1}{M} \sum_{A_m=0}^{M-1} |h_{0j}^{(k, A_m)}|^2, \quad j=1, \dots, W \quad (9)$$

其次, 利用噪声门限确定强径信号及其所处的位置。此处, 噪声门限的设定为噪声功率的两倍。本文中, 本小区强径信号的选择采用的方法如下: 将高于噪声门限的径作为备选强径, 系统分配给本小区的每个激活用户的强径个数不超过预先设置的最大值, 所选的强径需在备选强径中, 且保证每个激活用户最少有一个强径。

3.3 相邻小区强径信号选择模块

相邻小区强径信号的选择包括两个部分: 一是要确定强干扰用户, 这些用户将参与到多小区联合检测中。二是选择强径信号。

相邻小区强径信号选择模块主要用于根据对应邻区的独立信道估计模块得到各个相邻小区用户的初步的 CIR 估值。从中选择不超过某个确定个数的强径信号。

在实际应用中, 相邻小区强径信号选择模块也可以采用多种方法从所有多径干扰信号中选择强径信号。本文采用的方法为: 首先根据各个相邻小区用户 CIR 中每一径的功率确定每个邻区用户的功率:

$$\overline{P_i^{(k)}} = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^W \overline{P_{ij}^{(k)}} \quad (10)$$

将系统所允许的参加多小区联合检测的最大用户数作为参加强径选择的备选用户数。再从选出的用户中选择 N 个最强的多径信号。其中, 参加多小区联合检测的强干扰用户中先选出一个最强径, 再从所有备选用户中选取其他强径信号。

3.4 产生强径选择的联合信道估计的系统矩阵

传统的联合信道估计的系统矩阵 \mathbf{G} 的定义如式(6)所示。引入强径选择后的信道估计矩阵仅保留矩阵 \mathbf{G} 中所选出的强径位置所对应的列。例如, $\mathbf{G}^{(k)}$ 表示用户 k 的信道估计矩阵, 设第3、第5和第6径为选定的该用户强径信号 CIR

所在的位置, 则 $\mathbf{G}^{(k)}$ 中仅保留第3、第5和第6列向量。

对于用户 k , 保留下来的矩阵记为 $\mathbf{G}_r^{(k)}$ 。将本小区 K_0 个接入用户和邻小区 K_1 个强干扰用户所对应的矩阵 $\mathbf{G}_r^{(k)}$ 排列成矩阵 \mathbf{G}_r

$$\mathbf{G}_r = (\mathbf{G}_r^{(1)}, \dots, \mathbf{G}_r^{(K_0)}, \dots, \mathbf{G}_r^{(K_0+K_1)}) \quad (11)$$

仅保留了各个用户有用 CIR 的信道冲激响应顺序排列为

$$\mathbf{h}_r^{(A_m)} = [\mathbf{h}_r^{(1, A_m)T}, \dots, \mathbf{h}_r^{(K_0, A_m)T}, \dots, \mathbf{h}_r^{(K_0+K_1, A_m)T}]^T \quad (12)$$

若选出的强径不属于任何一个强干扰用户, 则将这些强径所对应的用户的相应列放在式(11)矩阵 \mathbf{G}_r 的最后, 相应的式(12)也要增加对应的分量, 但这部分分量仅对提高信道估计精度起作用, 并不用于多小区联合检测算法。

3.5 基于 MMSE 的联合信道估计模块

根据新确定的强径选择的联合信道估计的系统矩阵 \mathbf{G}_r , 利用 MMSE 准则进行估计, 则

$$\hat{\mathbf{h}}_{r1}^{(A_m)} = (\mathbf{G}_r^H \mathbf{G}_r + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}_r^H \mathbf{e}_{\text{mid}}^{(A_m)} \quad (13)$$

由于矩阵 \mathbf{G}_r 相比于矩阵 \mathbf{G} 列数降低了, 则矩阵 $\mathbf{G}_r^H \mathbf{G}_r$ 的维数就降低了。例如, 选取本小区和邻区强干扰用户的总数 $K_0 + K_1 = 8$, CIR 的长度 $W = 16$, 用于信道估计的接收信号长度为 $L = 128$, 则矩阵 \mathbf{G} 的大小为 128×128 。根据 ITU 定义的典型信道模型, 有用强径的数目一般不超过3个。较保守地考虑, 如果平均每个用户选4个有用多径, 则矩阵 \mathbf{G}_r 的大小为 128×32 , $\mathbf{G}_r^H \mathbf{G}_r$ 的大小降为 32×32 。

在最终的 CIR 结果中, 所有未被选中的弱径信号所对应的分量都置为零, 其他分量也要通过将低于噪声门限的分量置为零的降噪处理过程^[7]。

4 算法复杂度和性能分析

4.1 算法复杂度分析

算法的复杂度的定量分析基于以下系统参数的设定: 天线为8, 参加多小区联合检测的用户数为8, 需要对周围6个邻小区进行信道估计, 平均每个用户选出的有用多径为4个。其中, 传统的联合多小区信道估计算法已经按照系统特性进行了优化处理, 包括利用 \mathbf{G} 矩阵的特性来降低 $(\mathbf{G}^H \mathbf{G})$ 的平均运算量等。而新算法中强干扰用户和强径的选择是每子帧都进行的。从定量分析可以看出: 联合多小区信道估计算法的运算量为 218.816MIPS, 强径选择的联合信道估计算法的运算量为 109.3312MIPS, 复杂度降低了一半。

4.2 算法的性能分析

图2给出的采用不同信道估计算法后, 对于室内-室外 (OTIA) 和车载 (VEHA) 两种信道下, 多小区联合检测的误码率曲线。可以看出采用选择强径的联合信道估计算法后, 误码率性能比联合多小区信道估计略有提升。说明新的信道估计法不仅运算复杂度大幅降低, 而且对性能还略有提升。

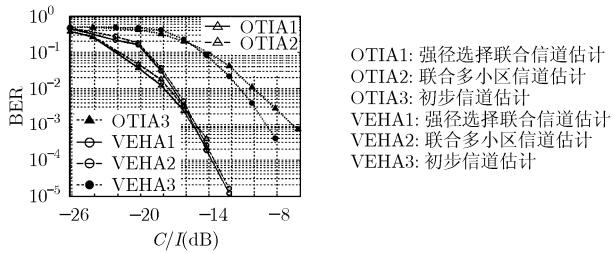


图2 3种信道估计方法下多小区联合检测的误码率曲线

5 结束语

强径选择的联合信道估计算法有效地克服了现有联合多小区信道估计算法的缺陷:首先,在运算量方面,由于降低了原有信道估计矩阵 \mathbf{G} 的维数,因而将运算量大幅降低。其次,由于每个用户 CIR 长度减少了,可以引入更多的相邻小区强干扰多径。第三,选择强径的方法使得系统资源的分配更加合理。最后,按照信号的径来选择,突破了按照用户选择的限制,更有利于提高信道估计精度,获得很好的 CIR 估计性能。

参考文献

- [1] 闫发军, 孙光永, 王文博. 采用扩展联合检测提高 TD-SCDMA 系统的健壮性[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(5): 66-69.
 - [2] Steiner B and Jung P. Optimum and suboptimum channel estimation for the uplink of CDMA mobile radio systems with joint detection [J]. *European Trans. Telecommunications Related Techniques*, 1994, 5(1): 39-50.
 - [3] 宋晓勤, 薛强, 李克. 无线移动通信系统中的联合信道估计方法与估计装置[P]. 中国发明专利: 200610011754.2, 2006.
 - [4] 彭木根, 王文博. TD-SCDMA 移动通信系统[M]. 第2版, 北京:机械工业出版社, 2007, 第3章.
 - [5] Klein A, Kaleb G K, and Baier P W. Zero forcing and minimum mean square error equalization for multiuser detection in Code-Division Multiple-Access channels [J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1996, 45(2): 276-287.
 - [6] Vollmer M, Haardt M, and Gotze J. Comparative study of joint-detection techniques for TD-CDMA based mobile radio systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2001, 19(8): 1461-1475.
 - [7] 康绍莉, 裘正定, 李世鹤. TD-SCDMA 系统中低代价信道估计方法的改进[J]. 通信学报, 2002, 23(10): 125-130.
- 宋晓勤: 女, 1973年生, 博士, 研究方向为无线网络与通信。
 胡爱群: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要从事无线网络及其安全技术的研究工作。
 李克: 男, 1972年生, 高级工程师, 主要从事 TD-SCDMA 系统的物理层算法、无线资源管理算法研究以及网络规划与优化工作。