

文章编号:1008-1542(2009)02-0141-05

MIMO-OFDM 系统中基于子载波分组 信道估计的改进算法

田永毅¹,倪宏斌²

(1. 陕西工业职业技术学院电气工程系,陕西咸阳 712000;2. 中国通信建设第二工程局,陕西西安 710119)

摘要:针对传统的 MIMO-OFDM 系统信道估计算法复杂度高、对导频结构有特殊要求的问题,提出了 2 种基于子载波分组信道估计改进算法。改进算法通过子载波分组将多天线信道估计转换成单天线信道估计来获取导频子载波信道响应,避免了大矩阵求逆运算,降低了算法的复杂度;利用 DFT 滤波算法或 LMS 自适应滤波算法得到整帧所有符号的信道响应,实现算法复杂度不变、估计性能的提高。理论分析和仿真结果表明,改进算法与传统的信道估计算法相比较,具有较低的复杂度和更好的估计性能。

关键词:多入多出正交频分复用;信道估计;复杂度;子载波分组

中图分类号: TN911.5 **文献标识码:** A

Improved subcarrier grouping channel estimation algorithms in MIMO-OFDM systems

TIAN Yong-yi¹, NI Hong-bin²

(1. Department of Electrical Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang Shaanxi 712000, China; 2. Construction 2nd Engineering Company Limited, China Telecom, Xi an Shaanxi 710119, China)

Abstract: In view of the defect of high complexity and the need for special pilot frame in the traditional MIMO-OFDM channel estimation algorithms, two improved channel estimation algorithms based on subcarrier grouping were researched. In improved algorithms, for avoiding the computation of large-scale matrix inverse operation and reducing algorithm complexity, channel responses of pilot subcarrier were obtained by single antenna channel estimation that is transformed from multi-antennas channel estimation by the method of subcarrier grouping. Then, channel responses of the whole frame signs were estimated with DFT filtering or LMS (Least Mean Square) adaptive filtering for better performance with complexity scarcely increasing. Theoretical analysis and simulation shows that the improved algorithms have lower complexity and better performance than the traditional channel estimation algorithms.

Key words: multiple input multiple output-orthogonal frequency division multiplexing; channel estimation; complexity; subcarrier grouping

MIMO-OFDM 技术将空间分集、频率分集和时间分集有机地结合在一起,可以提高无线通信中的信道容量和传输速率,有效抵抗信道衰落、抑制对信道的干扰和噪声^[1],因此被视为新一代无线通信系统潜在的解决方案。

收稿日期:2008-12-18;修回日期:2009-02-28;责任编辑:陈书欣

作者简介:田永毅(1974-),男,陕西户县人,讲师,硕士,主要从事移动通信方面的研究工作。

MIMO-OFDM 系统中信道估计对相干检测至关重要。文献[2,3]提出了几种基于导频的 LS 信道估计算法,但这些算法估计性能很差,而且在实现过程中涉及到大矩阵求逆,算法的复杂度很高。虽然也有人提出了各种改进算法^[4,5],提高了估计的性能,但这些算法实际上是利用特殊导频结构将多天线信道等效为多个并行多天线信道,依然存在着运算复杂度高、且对导频结构的设计和收发天线数目有严格限制的缺点,很难满足实际要求。

笔者提出了 2 种改进的基于子载波分组信道估计算法,以期在提高算法性能的同时降低算法的复杂度。

1 系统模型

MIMO-OFDM 系统简化模型见图 1。

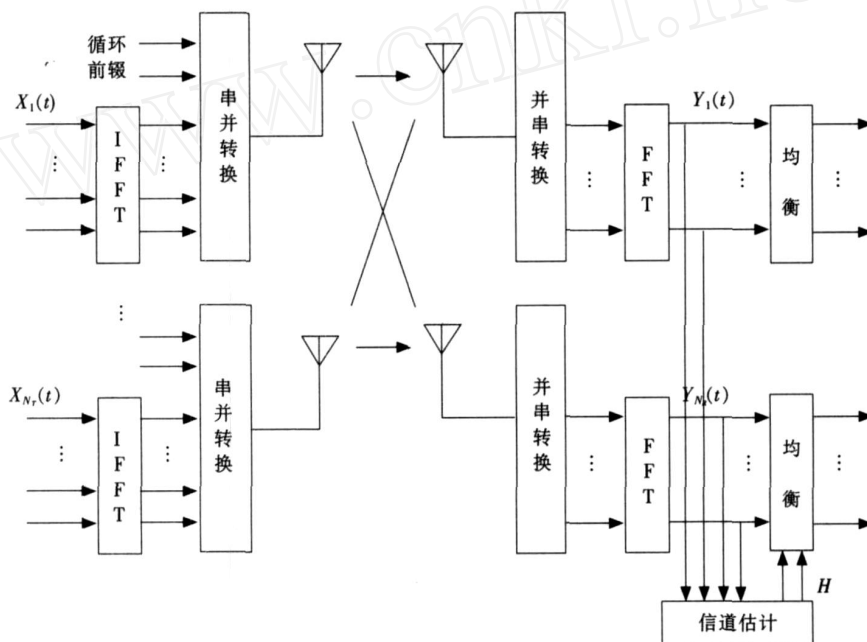


图 1 MIMO-OFDM 系统简化模型

Fig. 1 Succinct model of MIMO-OFDM systems

该系统有 N_T 条发送天线, N_R 条接收天线。设第 i 条发送天线和第 j 条接收天线间的第 l 条多径时域信道响应表示为 $h_i^j(l)$, 其中 $i=1,2, \dots, N_T; j=1,2, \dots, N_R; l=0, \dots, L-1$ 。在 MIMO-OFDM 信道估计中,各条接收天线独立处理。为了表示简单,可省略接收天线序号,即时域信道响应为 $h_i(l)$,频域信道响应表示为 $H_i(k)$,其中 $k=0, \dots, K-1$ ($K-1$ 分别表示子载波的序号和个数)。第 i 条发送天线,第 t 个 OFDM 符号,第 k 个子载波的信号表示为 $X_i(k, t)$ 。

在接收端,天线接收到的信号经过串并转换、去除循环前缀和 FFT 后得到频域信号 $Y(k, t)$, 表示为

$$Y(k, t) = \sum_{i=1}^{N_T} [X_i(k, t) H_i(k)] + N(k, t). \tag{1}$$

其中,加性高斯白噪声项 $N(k, t) = \sum_{n=0}^{K-1} (n, t) W_n^k$; (n, t) 是方差为 $\frac{2}{n}$ 的加性高斯白噪声。

定义: $Y = [Y(0) \ Y(1) \ \dots \ Y(K-1)]^T$; $X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_{N_T}]$; $H = [H_1^T \ H_2^T \ \dots \ H_{N_T}^T]^T$; $X_i = \text{diag}(X_i(0) \ X_i(1) \ \dots \ X_i(K-1))$; $H_i = [H_i(0) \ H_i(1) \ \dots \ H_i(K-1)]^T$; $N = [N(0) \ N(1) \ \dots \ N(K-1)]^T$ 。

则式(1)可写成矩阵形式:

$$Y = XH + N. \tag{2}$$

2 基于子载波分组信道估计的改进算法

笔者提出的基于子载波分组信道估计的改进算法的基本设想是:通过子载波分组将多天线信道估计转换成单天线信道估计来获取导频子载波信道响应——这样既避免大矩阵求逆运算,降低算法的复杂度,又抑制了随机噪声对信道估计带来的负面影响,提高了估计性能;再利用 DFT 插值算法或 LMS 自适应滤波算法得到整帧所有 OFDM 符号的信道响应,进一步提高估计性能。

2.1 基于子载波分组的 LS-DFT 信道估计算法

基于子载波分组的信道估计算法是将所有天线发送的 OFDM 子载波均匀分组,每个 OFDM 的 K 个子载波被均匀分为 $L = K/M$ 组,每组 M 个子载波。由于 MIMO-OFDM 系统相邻子载波频域信道响应变化缓慢^[6],可以近似认为一个分组内的 M 个子载波的频域信道响应相等,每条发送天线使用不同的子载波组,进行单天线的信道估计。

将第 i 个发送天线的第 k 个分组到接收天线的这 M 个子载波的信道响应看作是相同的,记作 $H_{i,k}$,则有下式成立:

$$Y_k = X_k H_k + N_k. \quad (3)$$

其中: $Y_k = [Y_i(kM) \quad Y_i(kM+1) \quad \dots \quad Y_i(kM+M-1)]^T$; $X_k = [X_{1,k} \quad X_{2,k} \quad \dots \quad X_{N_i,k}]$; $X_{i,k} = [X_i(kM) \quad X_i(kM+1) \quad \dots \quad X_i(kM+M-1)]^T$; $H_k = [H_{1,k} \quad H_{2,k} \quad \dots \quad H_{N_T,k}]^T$; N_k 为随机噪声。

根据 LS 信道估计准则,定义代价函数为

$$= (Y_k - X_k H_k)^H (Y_k - X_k H_k).$$

在每个分组中子载波数 M 不小于 N_T 的条件下,可以得到多天线信道响应:

$$H_k = X_k^H (X_k X_k^H)^{-1} Y_k. \quad (4)$$

在接收端提取导频位置 mR (其中 $m = 0, 1, \dots, M-1$) 的符号,代入式(4)得到导频位置信道响应的估计值,然后通过插值算法,得到整帧所有 OFDM 符号的信道响应。

在这里可供选择的插值算法很多,尤其是复杂度较低的一阶插值算法得到了广泛的关注。然而,无论线性内插还是多项式内插都会产生插值噪声,在信道时延很小时,插值噪声所造成的插值误差甚至远大于加性高斯白噪声所带来的插值误差。为进一步减小子载波间干扰、加性高斯白噪声和插值噪声对估计性能的影响、提高估计性能,在利用基于子载波分组的 LS 算法得到导频信道的估计值的基础上,用 DFT 插值算法获取整帧所有 OFDM 符号的信道响应。其具体方法如图 2 所示。

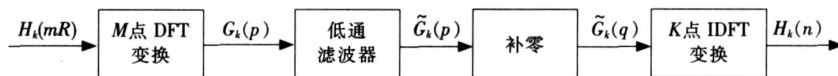


图 2 DFT 信道估计算法流程

Fig. 2 Flow of DFT channel estimation algorithm

对导频位置 mR 处信道估计值 $H_k(mR)$ 进行 M 点 DFT 后的表达式(变换域表达式)为

$$G_k(p) = \sum_{m=0}^{M-1} H_k(mR) \exp(-j \frac{2}{M} mp). \quad (5)$$

其中 $p = 0, 1, \dots, M-1$ 为变换域的频率。经分析可知, $G_k(p)$ 的信号分量主要分布在 $p = 0$ 和 $p = M-1$ 附近,而噪声分量分布在整个频段。

$G_k(p)$ 通过低通滤波器后,

$$\tilde{G}_k(p) = \begin{cases} G_k(p), & 0 \leq p \leq p_{\text{off}}, M - p_{\text{off}} \leq p \leq M - 1, \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (6)$$

其中 p_{off} 为变换域低通滤波器的截止频率。滤波后噪声分量降低为原来的 $2p_{\text{off}}/M$ 。

把变换域序列 $\tilde{G}_k(p)$ 补 $K-M$ 个零,使其扩充为长度为 K 的序列(补零在 $p = M/2$ 附近进行),然后将该序列进行 IDFT 变换,得到所有 OFDM 符号信道响应。

$$H_k(n) = \sum_{q=0}^{K-1} \tilde{G}_k(q) \exp(-j \frac{2}{K} qn), \quad 0 \leq n \leq K-1. \quad (7)$$

其中:

$$\tilde{G}_k(q) = \begin{cases} \tilde{G}_k(p), & 0 \leq q \leq p_{\text{off}}, \\ 0, & p_{\text{off}} \leq q \leq K - p_{\text{off}}, \\ \tilde{G}_k(q - K + M), & K - p_{\text{off}} \leq q \leq K - 1. \end{cases}$$

2.2 基于子载波分组的LS-LMS信道估计算法

为了在算法复杂度较低的前提下进一步提高估计性能,可以在利用子载波分组的LS算法得到导频信道估计值的基础上,考虑用MMSE准则的估计算法代替插值算法以获得较好的估计性能。

LMS算法是一种基于MMSE准则的自适应滤波算法,该算法不但复杂度较低,而且应用于信道估计时可充分利用信道的前后相关性,减少噪声对信道估计性能的影响。

基于子载波分组的LS-LMS信道估计算法分2步进行。

第1步:根据上文提出的基于子载波分组的LS频域信道估计算法估计出导频位置信道响应,并赋LMS信道估计的初始值 \mathbf{H}_0 。

第2步:利用LMS自适应滤波算法进行迭代以获得整个帧所有OFDM符号的信道响应。

将LMS算法用于信道估计时有

$$\mathbf{H}_n = \sum_{i=1}^K \hat{\mathbf{w}}_n(i) \mathbf{H}_{n-K+i-1}, \tag{8}$$

其中,权系数的更新式为

$$\hat{\mathbf{w}}_{n+1} = \hat{\mathbf{w}}_n(i) + \mu \mathbf{H}_{n-K+i-1} (\mathbf{H}_d - \mathbf{H}_n), \quad i = 1, 2, \dots, K. \tag{9}$$

式中: \mathbf{H}_n 为第 n 次迭代的输出; $\hat{\mathbf{w}}_n$ 为横向滤波器的权向量($\hat{\mathbf{w}}_n$ 的维数应该与 \mathbf{H}_n 相符); \mathbf{H}_d 为信道响应的期望; μ 为步长因子。在小信噪比时,较小的 μ 可以使收敛过程平稳;大信噪比时,较大的 μ 可以提高收敛速度。因此,根据不同的信噪比动态的选择 μ 可以进一步提高LMS算法性能。

LMS信道估计算法流程见图3。

3 算法性能与复杂度分析

设: $\mathbf{H}_i = \mathbf{H} + \mathbf{n}_i, i \in [1, M]$, 其中, \mathbf{n}_i 是方差为 σ_n^2 的高斯噪声;则传统的多天线LS频域信道估计的方差为

$$MSE = E \left[\sum_{i=1}^M \|\mathbf{H}_i - \mathbf{H}\|^2 \right] = E \left[\sum_{i=1}^M \|\mathbf{n}_i\|^2 \right] = M \sigma_n^2. \tag{10}$$

而对于基于子载波分组的LS频域信道估计算法,有

$$\mathbf{H} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{H}_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\mathbf{H} + \mathbf{n}_i) = \mathbf{H} + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{n}_i. \tag{11}$$

$$MSE = E \left[\sum_{i=1}^M \|\mathbf{H} - \mathbf{H}_i\|^2 \right] = E \left[\sum_{i=1}^M \left\| \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{n}_i \right\|^2 \right] = \sigma_n^2. \tag{12}$$

由式(11)和式(12)可知,基于子载波分组的LS频域信道估计算法估计性能显然优于传统的多天线LS信道估计,这是由于分组中各子载波的频域信道响应近似相等,因此在一定程度上抑制了随机噪声对信道估计带来的负面影响,改善了信道估计的性能^[7]。

基于子载波分组的LS-DFT信道估计算法在利用基于子载波分组的LS频域信道估计算法估计出导频位置信道响应后,又利用DFT滤波算法滤除了超出保护间隔的信道冲击响应,由于信道冲击响应在这段时间内的能量较少,消除的部分主要是由于插值带来的在这部分时间上的噪声,这样就能够减少插值带来的噪声影响,因此能进一步提高估计性能。

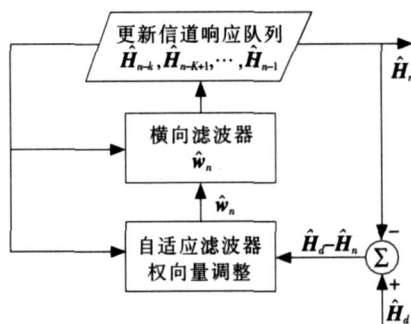


图3 LMS信道估计算法流程
Fig.3 Flow of LMS(least mean square) channel estimation algorithm

相对于基于子载波分组的 LS-DFT 算法,由于 LMS 算法一般较之 DFT 算法的估计性能更好,故基于子载波分组的 LS-LMS 算法估计性能更好。

基于子载波分组的信道估计改进算法的复杂度主要取决于导频子载波的多天线信道响应获得的复杂度。与传统的多天线 LS 频域信道估计算法相比较,基于子载波分组的 LS-DFT 和 LS-LMS 信道估计算法都将原来的 $K \times K$ 阶矩阵求逆转化为多个 $N_T \times N_T$ 阶矩阵求逆,从而降低了算法的复杂度。并且,改进算法对导频结构的设计和收发天线数目也没有特殊要求。

相对于基于子载波分组的 LS-线性插值算法,LS-DFT 算法由于进行了 DFT/IDFT 操作,算法的复杂度会有所增加(由于 DFT/IDFT 有快速算法,故算法复杂度增加的并不很大),这是提高估计性能的必然代价。

相对于 DFT 算法,由于 LMS 算法收敛速度较慢,算法复杂度较高,故可以认为基于子载波分组的 LS-LMS 算法相对于 LS-DFT 算法性能的提高是以收敛速度的降低、算法复杂度的提高为代价的。

4 仿真结果与分析

通过 Matlab 仿真对各种信道估计算法性能进行了比较,仿真条件如下。

发射天线数 4,接收天线数 8,子载波数 64,载频 3.5 GHz,信号带宽 20 MHz,移动速度 5 km/h,多径数 6,最大多径时延 500 ns,调制方式 QPSK。

基于子载波分组的信道估计算法与传统的多天线 LS 频域信道估计算法误比特率性能如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,各种基于子载波分组的 LS 频域信道估计算法较之多天线 LS 频域信道估计算法误比特率性能均有明显的改善,其中子载波分组的 LS-LMS 算法优于 LS-DFT 算法,LS-DFT 算法优于 LS-线性插值算法。

基于子载波分组的信道估计算法与传统的多天线 LS 频域信道估计算法均方误差性能如图 5 所示。

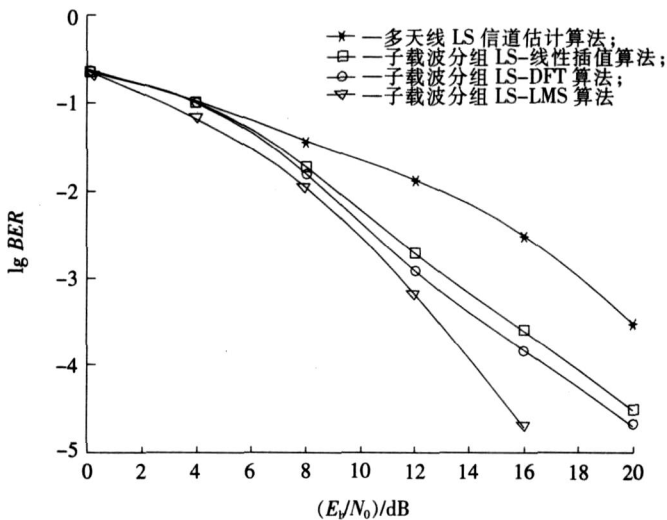


图 4 算法误比特率性能曲线

Fig. 4 BER curve of algorithm

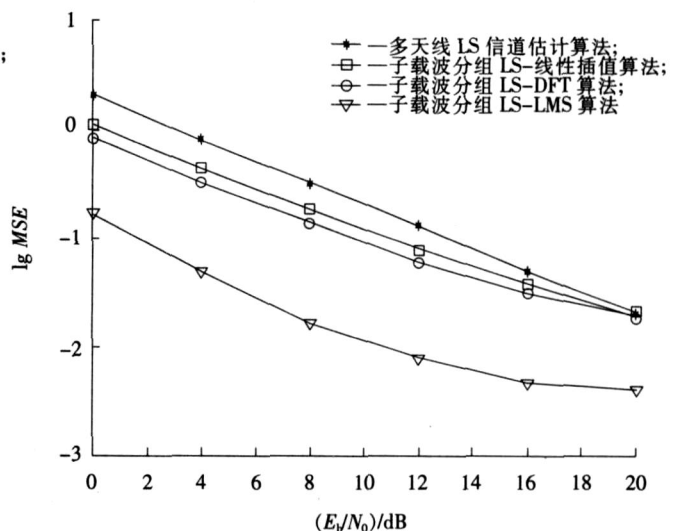


图 5 算法均方误差性能曲线

Fig. 5 MSE curve of algorithm

从图 5 中可以看出,各种基于子载波分组的 LS 频域信道估计算法的均方误差性能均优于多天线 LS 频域信道估计算法,其中子载波分组的 LS-LMS 算法的均方误差性能较之其他算法有显著改善。

5 结 语

理论分析与仿真结果表明,笔者提出的基于子载波分组的 LS-DFT 和 LS-LMS 信道估计算法的性能与复杂度均明显优于传统的多天线信道估计算法。相对于基于子载波分组的 LS-DFT 算法,LS-LMS 算法的估计性能更好,但其也具有收敛速度慢、复杂度较高的缺点。所以在实际应用中可以根据 MIMO-OFDM 系统的具体要求来合理选择 LS-DFT 或 LS-LMS 算法来满足信道估计的要求。

(下转封三)

(上接第 184 页)

4 电网投资效益评价方法的优越性

目前已有的电网效益评价方法都是对单个项目、单个领域、单个阶段以及单一类型的评价,但本研究却是对多目标、多阶段、多主体和多层次的整个电网持续投资期间内的评价。

1)多目标 该方法对电网公司投资及其全寿命周期管理的评价不仅考虑到成本最小这一目标,还考察其是否能满足电网安全可靠运行的要求,是否能满足在一定负荷增长与自然条件下达到一定的效能,使评价在成本、安全和效能等目标之间进行权衡。

2)多阶段 统筹考虑到电网规划、可研、设计、建设、运行维护直至退出这一全过程的各个阶段,权衡了总体投入、故障成本及环境成本,反映出各阶段管理的流程运转、信息统一处理与共享效率等。

3)多主体 电网投资效益管理在电网公司的实施,不仅会涉及到公司内部各部门和员工的利益,还会对公司外部的电力用户、设备与材料供应商、国家相关监管部门等产生影响。采用本方法对电网投资及其全寿命周期管理实施评价时兼顾了多个主体的需要和利益。

4)多层次 电网投资结构分类复杂、覆盖面广、地域分布广泛、管理分散、数量庞大,在投资形式上可以分为大区、省、地、市、县多个层次。而且,对电网投资的全寿命周期管理涉及到公司的各个层次:操作层、管理层和战略层,而且每一个层次都有不同的要求和目标。本方法可以结合每一个层次的特点,灵活采用相应的评价指标体系进行评价。

参考文献:

[1] LI Xue-jun. An evaluation method of mechanical equipment health state on the basis of fuzzy synthetic evaluation[A]. The Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery[C]. [s.l.]:[s.n.],2007.

[2] 肖明,赵宏伟,王晓峰.用熵确定权重的方法研究[J].商场现代化,2007(6):21-22.

[3] 杨宇.多指标综合评价中赋权方法评析[J].理论新探,2006(7):18-19.

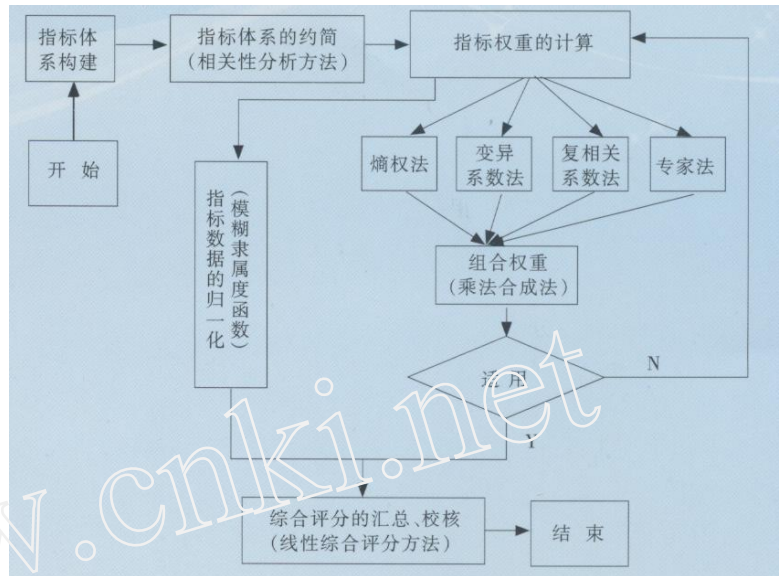


图 2 电网投资效益评价模型流程

Fig. 2 Diagram of circuit of investment returns evaluation model of grid

(上接第 145 页)

参考文献:

[1] 张海滨. 正交频分复用的基本原理与关键技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.

[2] LI Y. Simplified channel estimation for OFDM systems with multiple transmit antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2002(1):67-75.

[3] LI Y,SESHADRI N,ARIYAVISSTAKUL S. Channel estimation for OFDM systems with transmitter diversity in mobile wireless channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,1999,17(3):461-471.

[4] SCHAFHUBER D,RUPP M, MATZ G, et al. Adaptive identification and tracking of doubly selective fading channel for wireless MIMO-OFDM systems[A]. 4th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications[C]. Rome:[s.n.],2003. 417-421.

[5] 梁永明,罗汉文,黄建国. MIMO-OFDM 系统中一种基于自适应滤波的信道估计方法[J]. 电子与信息学报,2007,29(2):310-313.

[6] LIU Zhi-qiang, XIN Yan, GIANNA KIS G B. Space-time-frequency coded OFDM over frequency-selective fading channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(10):2 465-2 476.

[7] 喻华文,尹俊勋,赖国庭. 多径衰落分群子载波 MIMO-OFDM 系统的性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(9):11-15.