

迭代接收机性能建模方法研究进展

薛昀, 江彬, 高西奇

(东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 针对迭代接收机的性能建模方法, 从等效模型、传递参数、性能提取及传递关系等 4 个方面概述了研究成果, 并归纳了各自特点及发展趋势。服从高斯分布的对数似然比信息等效模型是迭代接收机性能建模研究的基础, 以互信息为传递参数并通过仿真获得互信息传递关系图, 以误比特率或保真度为传递参数的半公式化传递关系及以互信息为传递参数的半公式化传递关系分别是性能分析、性能优化及链路联合设计等 3 种应用场景下性能建模的代表性方法, 是迭代接收机性能建模研究的发展方向。

关键词: 迭代接收机; 对数似然比信息分布; 传递参数; 性能提取; 传递关系

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)09-0164-11

Advance of performance modeling for Turbo receivers

XUE Yun, JIANG Bin, GAO Xi-qi

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Aiming at the performance modeling for Turbo receivers, the research results are summarized, in the meanwhile, the characteristics and future trends are concluded in terms of equivalent model, transitive parameter, performance abstraction and transitive relation. The Gaussian distribution of equivalent model for log-likelihood ratios is the foundation of performance modeling research. Representative methods for application scenarios such as performance analysis, performance optimization and joint design with link are to derive the transfer chart with mutual information as transitive parameter, to derive semi-analytical transitive relation with bit error rate or fidelity as transitive parameter and to derive semi-analytical transitive relation with mutual information as transitive parameter, respectively. These methods represent the development direction of performance modeling for turbo receivers.

Key words: Turbo receivers; distribution of log-likelihood ratio; transitive parameter; performance abstraction; transitive relation

1 引言

迭代接收机是提高无线通信系统接收性能、逼近信道容量的有效方法, 由检测器和译码器等软输入软输出 (SISO, soft-input soft-output) 单元构成, 并在 2 个 SISO 单元之间互相交换软信息, 迭代工作以提高系统性能。检测器由均衡器、软调制器和软解调器等模块构成, 由于线性均衡器具有良好的

性能和较低的实现复杂度, 因此在实际应用中通常采用线性最小均方误差均衡器^[1,2]。

自迭代接收机出现至今, 其性能获取一直备受研究者关注^[3~11]。迭代接收机的算法研究及验证均需迭代接收机性能分析^[3]。均衡器系数的自适应调整^[3,4]、均衡器切换准则^[3]及迭代停止准则^[5]等迭代接收机性能优化工作需要及时获得迭代接收机各次迭代的性能。迭代接收机联合链路自适应传输^[6~8]、混

收稿日期: 2014-02-12; 修回日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61320106003, 61201171, 61222102); 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (2012AA01A506); 中国博士后科学基金资助项目 (2012M511174); 国家博士点基金资助项目 (20120092120015)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61320106003, 61201171, 61222102); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA01A506); The Science Foundation for Post Doctorate Research (2012M511174); The Doctoral Program of Higher Education of China (20120092120015)

合自动重传^[9]或无线资源管理^[10]的设计，即链路联合设计，能够以迭代接收机性能最优为准则。因此，在性能分析、性能优化及链路联合设计等 3 种场景下获取的迭代接收机性能具有较大应用价值。迭代接收机性能可以通过 3 条途径得到：①随机实验^[1]，在具备实际接收信号条件下，按照迭代次数逐次实验得到等效信噪比、误比特率及误码字率等具体性能指标；②求解错误概率^[12]及信息速率的界限^[11]，得到成对错误概率、可达速率等；③性能建模，在迭代接收机似然比信息（软信息）的分布类型确定后，根据分布类型选取传递参数，并对迭代接收机的一个或者多个 SISO 单元的输入、输出参数建立传递关系，从而跟踪传递参数在收敛过程中演化的规律（收敛行为），最终将输出参数映射成性能指标。

由于在整个收敛过程中跟踪传递参数，性能建模能够得到各次迭代的具体性能指标。这种“一举多得”特点使得性能建模适合在迭代接收机性能分析中使用。由于跟踪接收信号在迭代接收机中传递软信息的参数，性能建模能够“在线”获取具体性能。这一特点使得性能建模适合在迭代接收机性能优化中使用。在不具备接收信号的情况下，性能建模方法可以按照软信息分布类型产生软信息，对 SISO 单元进行模拟，从而建立 SISO 单元的传递关系。这一被称作“预测”的特点，使得迭代接收机性能可以作为链路联合设计的优化对象，因此性能建模适合在链路联合设计中使用。然而，随机实验法及性能界限法并不具备这 3 个特点。

迭代接收机的发展经历了不到二十年时间，其性能获取方法却有了很大变化，如图 1 所示。从最初的随机实验方法到性能界限方法，都很难给出迭代接收机的收敛行为，揭示迭代接收机的收敛行为无从谈起。这时就需要考虑迭代接收机性能建模方法。成功应用性能建模的例子很多，如我国的第四代移动通信系统^[6,7]、欧洲的 ARTIST 4G 系统^[8]。对上述性能建模方法如果考虑软信息的分布、信道估计方法甚至计算复杂度的影响，会使得性能建模方法的研究更加复杂化。

当前对迭代接收机性能建模方法的研究仍处于持续发展的态势中，本文以最小均方误差迭代接收机为背景，重点对性能建模研究进展做分析评述。首先介绍迭代接收机模型，然后着重论述等效模型、传递参数、性能提取及传递关系这 4 个要点，

系统地论述近年来性能建模的研究进展和成果，并探讨未来研究方向。文中所用符号说明如表 1 所示。

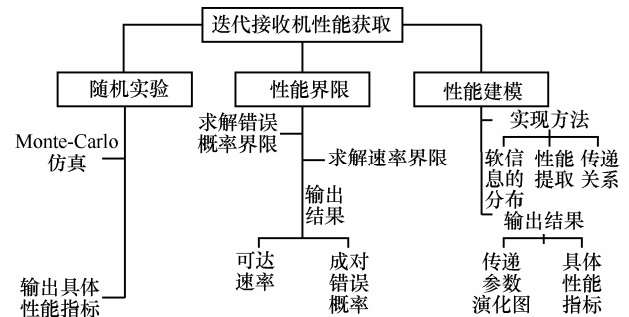


图 1 迭代接收机性能获取方法

表 1 符号说明

符号	说明
$(\cdot)^H$	矩阵或向量的共轭转置
$(\cdot)^T$	矩阵或向量的共轭转置
a_m	向量 a 的第 m 个元素
$[A]_{m,n}$	矩阵 A 的第 (m, n) 个元素
I_N	$N \times N$ 单位矩阵
e_k	第 k 个元素为 1，其他元素为 0 的列向量
$E\{\cdot\}$	随机变量的期望
$\text{Var}\{\cdot\}$	随机变量的方差

2 迭代接收机模型

为便于讨论，考虑 DFT 扩展 OFDM 系统在单个 OFDM 符号上的频域接收信号模型。传输信道采用多天线发送和多天线接收（MIMO）信道。迭代接收机模型是单用户迭代接收机，因为单用户与多用户的迭代接收机在 MIMO 传输情况下具有较为相似的结构，并且由单用户迭代接收机的性能建模很容易扩展到多用户迭代接收机的性能建模。另外，性能建模方法所关注的是一个特定用户的性能。

单用户传输情况下第 r 个接收天线上频域接收信号可表示为

$$y_r = H_r F s + z_r$$

其中， s 表示用户的发送信号向量，其各个元素为编码调制后生成的调制符号，取自调制符号集 $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_{2^Q}\}$ ，假设其元素的个数为 K ； F 是 $K \times K$ 的归一化 DFT 矩阵； H_r 是 $K \times K$ 的对角矩阵，其对角元素表示第 r 个接收天线与用户发送天线之间频域信道参数； z_r 是第 r 个接收天线上的加性高斯噪声向量，其均值为 0、方差阵为 $\sigma^2 I_K$ 。设

$\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1^T \ \mathbf{y}_2^T \ \cdots \ \mathbf{y}_R^T]^T$, $\mathbf{z} = [\mathbf{z}_1^T \ \mathbf{z}_2^T \ \cdots \ \mathbf{z}_R^T]^T$, 则接收信号可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{s} + \mathbf{z}$$

其中,

$$\mathbf{H} = [(\mathbf{H}_1)^T \ (\mathbf{H}_2)^T \ \cdots \ (\mathbf{H}_R)^T]^T$$

此外, 传输的信息比特序列构成的向量为 $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_{N_b}]^T$, 编码交织后的码比特序列构成的向量为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ 。

图 2 给出迭代接收机, 其中, SISO 检测器表示软输入软输出检测器, SISO 译码器表示软输入软输出译码器。SISO 检测器的输入信号为接收信号 \mathbf{y} 和码序列 x_n 的先验信息 $L_{A,DET}(x_n)$, $L_{A,DET}(x_n)$ 来自译码器的反馈。SISO 检测器的输出信号为码序列 x_n 的软信息 $L_{E,DET}(x_n)$, 可以作为软解调器的先验信息 $L_{A,DEM}(x_n)$ 。均衡器的输入信号为接收信号 \mathbf{y} 和发送信号 s_k 的均值 μ_{s_k} 与方差 v_{s_k} , 所需的均值和方差由 $L_{A,DET}(x_n)$ 经过均值方差计算器 (亦称软调制器) 计算得到, 均衡器的输出信号为发送信号 s_k 的估计值 \hat{s}_k 和估计误差的方差 v_{s_k} 。利用均衡器的输出信号和采用的调制方式, 可以由软解调器计算出 $L_{E,DET}(x_n)$ 。

软调制器的任务是利用先验信息获取符号的均值和方差, 第 i 次迭代后的计算公式分别为

$$\bar{s}_k^{(i)} = \sum_{s \in \mathcal{A}} sP(s_k) \quad (1)$$

$$v_k^{(i)} = \sum_{s \in \mathcal{A}} |s - \bar{s}_k| ^2 P(s_k) \quad (2)$$

其中, $P(s) = \exp\left(\sum_{q=1}^Q \mu_q^{-1}(s)L_{A,DET}^{(i)}(x_q)\right) / \prod_{q=1}^Q (1 +$

$\exp(L_{A,DET}^{(i)}(x_q)))$, $\mu_q^{-1}(s) = x_q$ 表示编码比特与符号的映射函数, 编码比特 $x_q \in \mathcal{B}$, $\mathcal{B} = \{0,1\}$ 。

采用频域均衡^[2], 则第 k 个符号的估计值为

$$\hat{s}_k^{(i)} = \mathbf{e}_k^H \mathbf{H}^H [\mathbf{H}\mathbf{V}^{(i)} \mathbf{H}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_R + (1 - v_k^{(i)}) \cdot \mathbf{H}\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^H \mathbf{H}^H]^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{s}}_k^{(i)} + \mathbf{H}\mathbf{e}_k \bar{s}_k^{(i)}]$$

其中, 符号的方差矩阵 \mathbf{V} 是对角阵, 第 j 个对角元素为

$$[\mathbf{V}]_{j,j} = \begin{cases} 1, & j = k \\ v_j, & j \neq k \end{cases}$$

$\hat{s}_k^{(i)}$ 的均值和方差为

$$\mu_k^{(i)} = E^2\{\hat{s}_k^{(i)} | s_k\} = \kappa_k^{(i)} \rho_k^{(i)} s_k \quad (3)$$

$$(\sigma_{v,k}^{(i)})^2 = \text{var}\{\hat{s}_k^{(i)} | s_k\} = (\kappa_k^{(i)})^2 \rho_k^{(i)} (1 - v_k^{(i)} \rho_k^{(i)}) \quad (4)$$

其中, $\kappa_k^{(i)} = [1 + (1 - v_k^{(i)}) \rho_k^{(i)}]^{-1}$, $\rho_k^{(i)} = (\omega_k^{(i)})^H \mathbf{H}\mathbf{e}_k$, $(\omega_k^{(i)})^H = \mathbf{e}_k^H \mathbf{H}^H \Sigma^{-1}$, $\Sigma_k^{(i)} = \mathbf{H}\mathbf{V}^{(i)} \mathbf{H}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_R$ 。

第 k 个符号的后验信干比为

$$\gamma_k^{(i)} = (\mu_k^{(i)})^2 / (\sigma_{v,k}^{(i)})^2 = \rho_k^{(i)} / (1 - v_k^{(i)} \rho_k^{(i)}) \quad (5)$$

检测器输出软信息为

$$L_{E,DET}(x_q) = \ln \frac{f_{E,DET}(l | \tilde{x}_q = +1)}{f_{E,DET}(l | \tilde{x}_q = -1)} = \ln \frac{\sum_{s_k \in S_q^+(\mathcal{A})} \exp(-\gamma_k |\hat{s}_k - s_k|^2) + \sum_{q' \neq q} \mu_{q'}^{-1}(s_k) L_{A,DEM}(x_{q'})}{\sum_{s_k \in S_q^0(\mathcal{A})} \exp(-\gamma_k |\hat{s}_k - s_k|^2) + \sum_{q' \neq q} \mu_{q'}^{-1}(s_k) L_{A,DEM}(x_{q'})} \quad (6)$$

其中, $S_q^\varepsilon(\mathcal{A}) = \{s | \mu_q^{-1}(s) = \varepsilon, \varepsilon \in \{0,1\}, q \in \{1,2,\dots,Q\}\}$ 为调制符号集合; \tilde{x} 是软信息分布函数中使用的编

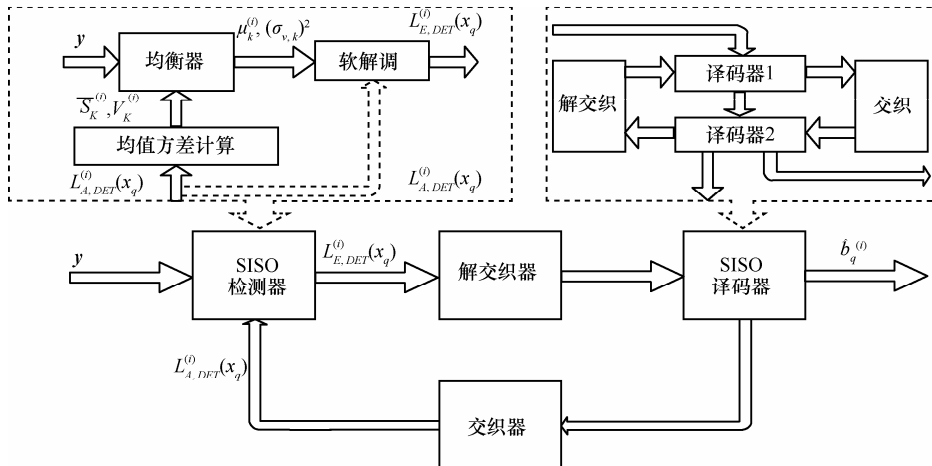


图 2 迭代接收机

码比特记号, 且 $\tilde{x}_q \in \tilde{\mathcal{B}}$, $\tilde{\mathcal{B}} = \{-1, +1\}$; $f_{E,DET}(l|\tilde{x}_q)$ 为检测器输出软信息 $L_{E,DET}(x_q)$ 的概率分布。

译码器输出软信息为

$$L_{E,DEC}(x_n) = \ln \frac{f_{E,DEC}(l|\tilde{x}_n = +1)}{f_{E,DEC}(l|\tilde{x}_n = -1)}$$

$$= \ln \frac{\sum_{x_{n=1}} \exp(x_n \sum_{n' \neq n} x_{n'} L_{A,DEC}(x_{n'}))}{\sum_{x_{n=0}} \exp(x_n \sum_{n' \neq n} x_{n'} L_{A,DEC}(x_{n'}))}$$

其中, $f_{E,DEC}(l|\tilde{x}_n)$ 为检测器输出软信息 $L_{E,DEC}(x_n)$ 的概率分布。

3 迭代接收机建模

迭代接收机的性能建模可分为确定性方法和随机方法 2 类^[13]。确定性方法^[14]将接收机的行为视作确定性过程, 并通过几何分析和不动点理论来揭示接收机的动态行为, 从而获取迭代接收机的性能。然而, 由于迭代过程不一定收敛于该类方法寻找到的不动点, 且不动点的存在性和唯一性对不同的传输码块也是不同的, 因此该类方法无法直接应用在实际系统中。随机方法^[13]将迭代接收机的行为视作若干个各态历经随机过程的级联, 通过研究各随机过程的分布并建立 SISO 单元的传递关系, 进而获得迭代接收机的参数演化图或性能。随机方法克服了确定性方法无法直接应用的缺点, 是当前迭代接收机性能建模的主流方法。

由于随机方法将迭代接收机的输入输出信号传输建模成各态历经随机过程, 迭代接收机性能建模不可避免地与此随机过程的分布紧密相关。随机过程的分布就是输入输出软信息的分布, 也可用等效模型表示, 是性能建模的首要问题。大部分性能建模方法以输入输出软信息高斯分布为依据选

取该分布的参数等作为传递参数, 获得了有价值的输出结果。本节从软信息的分布入手, 对迭代接收机性能建模方法的发展历程和发展趋势进行阐述。

3.1 等效模型

检测器及译码器的输入输出软信息分布可由 3 种方法获取: 不对软信息的分布做任何假设, 通过仿真统计软信息的分布^[15,16]; 软信息为混合高斯分布, 分布函数需要用复杂的方法确定^[17]; 在一些易满足的前提条件下, 软信息为高斯分布。迭代接收机性能建模发展到现阶段, 通过仿真统计分布函数的方法受到实现复杂度的制约, 较少被采用。软信息为混合高斯分布情况下性能建模方法尚未有文献公开发表。而软信息为高斯分布情况下的性能建模方法由于切实可行而得到广泛关注^[3-5,9-13,18-34]。

表 2 给出了迭代接收机各 SISO 单元的软信息高斯分布函数及与之对应的等效模型。其中, $\phi_{a,b^2}(\xi) = \exp(-(\xi - a)^2 / 2b^2) / \sqrt{2\pi b^2}$, $\phi'_{a,b^2}(\eta) = \exp(-|\eta - a|^2 / b^2) / (\pi b^2)$ 分别是均值为 a 、方差为 b^2 的实高斯分布函数和复高斯分布函数, 且 $Q(x) = \int_x^\infty \phi_{0,1}(l) dl$ 。为便于讨论, 符号或编码比特的迭代次数及索引被省略。下面介绍各 SISO 单元输入输出软信息的分布函数及等效模型, 同时一并给出在软信息高斯分布下的各 SISO 单元传递关系。

3.1.1 均衡器

在迭代接收机中, 为了简化检测器输出软信息计算^[1], 对均衡器输出符号的转移概率 $f(\hat{s}|s)$ 做高斯近似。表 2 中, μ 表示符号的等效信号幅度, σ_v^2 表示符号的方差, 分别由式(3)和式(4)确定; n_v 是加性高斯噪声, 其均值为 0、方差为 σ_v^2 。

3.1.2 检测器

在性能建模方法中, 检测器输入软信息分布函

表 2 软信息分布及等效模型

SISO 单元	软信息分布或符号转移概率	等效模型
均衡器	$f(\hat{s} s) = \phi'_{\mu, \sigma_v^2}$	$\hat{s} = \mu s + n_v$
检测器	$f_{A,DET}(l \tilde{x}) = \phi_{\mu_{A,DET}, \sigma_{A,DET}^2}$	$L_{A,DET}(x) = \mu_{A,DET} \tilde{x} + n_{A,DET}$
	$f_{E,DET}(l \tilde{x}) = \phi_{\mu_{E,DET}, \sigma_{E,DET}^2}$	$L_{E,DET}(x) = \mu_{E,DET} \tilde{x} + n_{E,DET}$
解调器	$f(z s) = \phi'_{0, \sigma_z^2}$	$z = s + \zeta$
	$f(c_q \tilde{x}_q) = \phi_{0, \sigma_{c_q}^2}$	$c_q = \tilde{x}_q + n_0, q \in \{1, 2, \dots, Q\}$
	$f(c \tilde{x}) = \phi_{0, \sigma_c^2}$	$c = \tilde{x} + n_w$
译码器	$f_{A,DEC}(l \tilde{x}) = \phi_{\mu_{A,DEC}, \sigma_{A,DEC}^2}$	$L_{A,DEC}(x) = \mu_{A,DEC} \tilde{x} + n_{A,DEC}$
	$f_{E,DEC}(l \tilde{x}) = \phi_{\mu_{E,DEC}, \sigma_{E,DEC}^2}$	$L_{E,DEC}(x) = \mu_{E,DEC} \tilde{x} + n_{E,DEC}$

数及输出软信息分布函数分别做高斯近似。仿真结果表明这种高斯分布的假设是合理的^[19]。表 2 中， $\mu_{A,DET}$ 和 $\sigma_{A,DET}^2$ 分别表示输入端软信息的均值和方差； $\mu_{E,DET}$ 和 $\sigma_{E,DET}^2$ 分别表示输出端软信息的均值和方差。

3.1.3 解调器

通过对均衡器等效模型归一化得到解调器接收符号等效模型^[20-22]。表 2 中， $f(z|s)$ 表示接收符号 z 在发送符号为 s 条件下的转移概率， ζ 是加性高斯噪声，其均值为 0、方差为 $1/\gamma$ 。假设解调器接收符号 z 的编码比特随机地通过 Q 个并行独立、无记忆的二进制输入的子信道^[20-22]。表 2 中， $f(c_q|\tilde{x}_q)$ 表示第 q 个子信道输出编码比特 c_q 在输入编码比特 \tilde{x}_q 条件下的转移概率， n_0 是加性高斯噪声，其均值为 0、方差为 $1/\gamma$ 。利用这个模型可以通过仿真的方法获得解调器的输出互信息^[20,21]。

3.1.4 译码器

为了降低软信息的密度评估的计算复杂度，对迭代中每个概率性分组的输入端和输出端观察得到的密度函数演化做高斯近似^[18]。同时又利用一致性条件^[16]进一步将高斯概率密度函数简化为译码轨道的单参数的表达。表 2 中， $f(c|\tilde{x})$ 译码器输入或输出比特转移概率做高斯分布近似， n_w 是加性高斯噪声，其均值为 0、方差为 w ^[16]； $f_{A,DEC}(l|\tilde{x})$ 及 $f_{E,DEC}(l|\tilde{x})$ 分别表示译码器的输入端及输出端软信息的高斯概率密度函数， $\mu_{A,DEC}$ 和 $\sigma_{A,DEC}^2$ 分别表示译码器先验软信息的均值和方差； $\mu_{E,DEC}$ 和 $\sigma_{E,DEC}^2$ 分别表示输出软信息的均值和方差^[18]。

3.2 随机方法

在软信息高斯分布的情况下，随机方法的基本思想可通过图 3 表达。图中，均衡单元组合表示均衡器联合解调器、调制器构成的单元组合，也可以就是均衡器。译码单元组合表示译码器联合解调器、调制器构成的单元组合，也可以就是译码器。

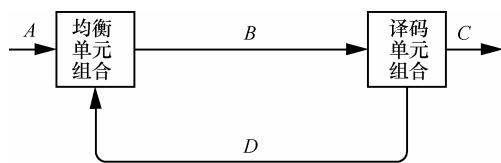


图 3 随机方法示意

在针对迭代接收机性能分析的建模中，均衡单元组合及译码单元组合表示迭代接收机。 B 及 D 表

示性能建模选定的传递参数， A 无意义。根据传递参数，利用软信息高斯分布的特点产生迭代接收机的软信息模拟均衡单元组合及译码单元组合的输入软信息。在针对迭代接收机性能优化的建模中，均衡单元组合及译码单元组合表示迭代接收机。 A 表示迭代接收机的接收信号。 B 及 D 表示性能建模选定的传递参数，该参数可以根据迭代接收机的软信息计算得到。在针对迭代接收机性能分析或性能优化的建模中， C 表示通过 D 映射得到的具体性能指标。由于采用了性能提取， B 、 D 都是标量。均衡单元组合的传递关系用 $T_1(\cdot)$ 表示，输入输出分别为 D 和 B ，即 $B = T_1(D)$ 。同理，译码单元组合的传递关系用 $T_2(\cdot)$ 表示，即 $D = T_2(B)$ 。由于 $T_1(\cdot)$ 和 $T_2(\cdot)$ 的输入、输出互反，2 个传递关系可以形成参数演化图。

在针对迭代接收机链路联合设计的建模中，均衡单元组合及译码单元组合表示性能模型。信号 A 表示信道实现及噪声方差。 B 及 D 表示性能建模选定的传递参数，且都是标量。 C 表示通过 D 映射得到的具体性能指标。因此，2 个模型的传递关系分别表示为 $B = T_1(D, A)$ 、 $D = T_2(B)$ ，这 2 个传递关系也可以形成参数演化图。 C 表示通过 D 映射得到的具体性能指标。为了 $T_1(\cdot)$ 成为可公式化计算的传递函数， B 通常被选定为互信息及附加传递参数迭代接收机的后验信干比。 D 作为附加传递参数，选定为译码单元组合反馈到均衡单元组合的符号方差。综上所述，在软信息高斯分布的情况下，随机方法研究可划分为 3 个要点：传递参数、性能提取及传递关系。下面分别阐述这 3 个要点。

3.3 传递参数

传递参数是由软信息的高斯概率密度函数确定并且能够映射到接收机性能的参数。在针对迭代接收机性能分析的建模中，传递参数能准确传递迭代接收机性能。除此之外，在针对迭代接收机性能优化及链路联合优化的建模中，传递参数还能满足检测单元组合公式化计算的要求。一般而言，传递参数有 2 种可能性：高斯概率密度函数的参数或迭代接收机的性能。

性能建模方法发展到现阶段，已经出现的传递参数有软信息的均值^[23]、方差^[19,23]及迭代接收机的误比特率^[4,23,24]、保真度^[5,23,25]、互信息^[20,22,23,27,35]。表 3 给出了传递参数的定义及近似表达式。表 3 中， μ 和 σ^2 分别表示软信息均值和方差， $P(\tilde{x})$ 表示编

码比特的先验概率； P_b 、 M 和 I 分别表示迭代接收机的误比特率、保真度和互信息，保真度是检测器或译码器输出码比特与输入码比特之间的相关性，互信息是关于每个码比特的软信息所含信息量； $f(l|\bar{x})$ 表示检测器或译码器的软信息高斯概率密度函数； l 和 L 表示软信息积分变量和 \bar{x}_n 的软信息；传递参数的近似式是在编码码块的长度趋于无穷并且每个编码比特的软信息独立同分布 2 个条件下给出的，对计算输入及输出传递参数帮助很大。

在针对迭代接收机性能分析的建模中，需要分别对检测器及译码器仿真建立各自传递关系，而传递关系就是输出传递参数与输入传递参数的关系。利用表 3 中的传递参数的定义，任意确定软信息的均值或方差，就可获得传递参数的初值。同样利用传递参数定义，可以在仿真结果中计算出输出传递参数。互信息作为传递参数最具有顽健性^[23]。

在针对迭代接收机性能优化的建模中，输入及输出传递参数的传递关系可以通过仿真获得^[23]，但是在线仿真的计算复杂度较大。在表 3 中，由于具有利用输入传递参数根据公式计算得到检测器的输出传递参数的特点，误比特率^[4]或保真度^[5]作为传递参数的性能建模方法受到关注。而互信息并不具备这一特点。此外，这 2 种传递参数就是迭代接收机性能优化的对象。

在针对迭代接收机链路联合设计的建模中，传递参数必须满足检测器的输出传递参数可以根据输入传递参数公式化计算完成。由于互信息作为传递参数就是互信息等效信噪比映射的中间变量，计算非常便利，因此互信息作为传递参数建立检测器的传递关系非常合适^[20]。然而，除了互信息以外，

表 3 所列传递参数都受到了互信息等效信噪比映射的限制。

3.4 性能提取

一般而言，编码码块长度较长，码块内的编码比特会通过不同的信道进行传输，译码器会有不同信道的传递参数输入。若利用每个编码比特的传递参数直接评估译码器输出的性能势必造成译码器的仿真次数增加，即便在译码器的传递关系存储为查找表时也会增加查找操作量。因此性能建模采用性能提取（亦称性能抽象、性能压缩）的方法，使得检测器输出标量形式的传递参数。

在针对迭代接收机性能分析的建模中，图 4 中的框图表示执行传递关系的性能预测模型，例如均衡单元执行均衡器的传递关系。 B 表示检测器输入软信息，且每个比特的软信息独立同高斯分布。 C 、 D 分别表示调制单元、均衡单元的输出， E 表示检测单元的输出传递参数，此时 A 无意义。由于软信息独立同分布，检测单元的输出标量的传递参数。这种性能提取方法在迭代接收机处于离线状态的情况下得到广泛应用^[3,23]，因为性能建模方法关注的是迭代接收机的收敛行为。但是，在针对迭代接收机性能优化的建模中，这种性能提取方法也得到了应用^[4]。

在针对迭代接收机性能优化的建模中，由于迭代接收机处于在线状态，因此性能提取方法针对与信道实现相关的参数求平均。同时为了满足检测器的输出传递参数可以根据输入参数公式化计算得到，这个求平均的对象与传递参数之间必须有明确的关系式。另外，性能提取方法最关键的是提取的精确度。对照上述要求，关于保真度^[5]及软信息均

表 3 传递参数的定义及近似表达式

传递参数	传递参数的定义	传递参数的近似表达式
均值	$\mu = \sum_{\bar{x} \in \mathcal{L}'} P(\bar{x}) \int_{-\infty}^{\infty} \bar{x} f(l \bar{x}) dl$	$\mu \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{x}_n L(x_n)$
方差	$\sigma^2 = \frac{1}{2} \sum_{\bar{x} \in \mathcal{L}'} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{x} (l^2 - \mu^2) f(l \bar{x}) dl$	$\sigma^2 \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L(x_n)^2 - \mu^2$
误比特率	$P_b = \frac{1}{2} \sum_{\bar{x} \in \mathcal{L}'} \int_{-\infty}^0 \bar{x} f(l \bar{x}) dl$	$P_b \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} (1 - \bar{x}_n \text{sign}(L(x_n)))$
保真度	$M = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2}{1 + \exp(l)} f(l \bar{x} = +1) dl$	$M \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tanh(L(x_n)/2)$
互信息	$I = \frac{1}{2} \sum_{\bar{x} \in \mathcal{L}'} \int_{-\infty}^{\infty} f(l \bar{x}) \text{lb} \left(\frac{2f(l \bar{x})}{f(l +1) + f(l -1)} \right) dl$	—

值^[19,24]求平均的方法在针对迭代接收机性能优化的建模中提出。图 4 中的框图表示迭代接收机， A 表示接收信号。 B 、 E 表示传递参数， C 无意义。 D 表示均衡器输出的保真度或软信息均值的平均。由于 D 是标量，因此 E 也是标量。

在针对迭代接收机链路联合设计的性能建模中，关于互信息求平均的方法被认为是最理想的性能提取方法^[20,26,30,36-38]。图 4 中的框图表示性能预测模型， B 、 E 分别表示传递参数互信息， D 表示后验信干比与均衡单元输出的软信息， A 、 C 无意义。根据解调器输出互信息，对这些互信息求平均。另外一种方法是对均衡器输出互信息求平均，此时 C 表示符号方差， D 分别表示传递参数互信息， A 、 B 及 E 无意义。在均衡器输出端，每个符号的互信息通过查找表获得。在得到平均互信息后， D 是一个标量。

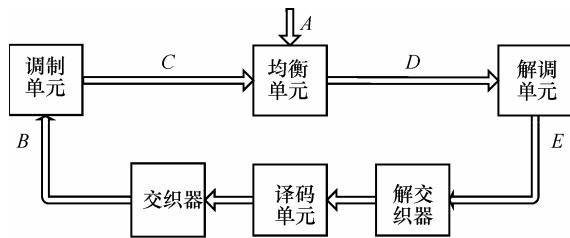


图 4 性能提取方法

关于符号方差求平均的方法^[19]是一种在针对迭代接收机性能优化及链路联合设计的建模中都能使用的方法。符号方差的均值通过调制器输出符号方差与检测器输入软信息的高斯概率密度函数乘积的积分得到。图 4 中 B 、 E 分别表示检测器输入、输出传递参数软信息方差， C 表示符号方差的平均值， D 无意义。在关于符号方差求平均后， E 是标量形式的传递参数。这种方法的缺点是：在多用户、高阶调制时，面临复杂的多维数值积分；利用符号方差的集合平均提取接收机性能，这种做法实质上是对后验信干比求平均。

3.5 传递关系

3.5.1 单参数传递关系

在针对迭代接收机性能分析及性能优化的建模中，选取一个传递参数，获得检测器、译码器的单参数传递关系，从而获得参数演化图。而在迭代接收机性能优化的建模中，由于译码器输出的传递参数与具体性能指标对应，因此通过跟踪迭代接收机的传递参数可以获得性能优化需要的性能指标。

表 4 根据现有传递参数，给出了检测器及译码器的单参数传递关系。

传递参数	检测器传递关系	译码器传递关系
均值	$\mu_{E,DET} = T_{DET}(\mu_{A,DET})$	$\mu_{E,DEC} = T_{DEC}(\mu_{A,DEC})$
方差	$\sigma_{E,DET}^2 = T_{DET}(\sigma_{A,DET}^2)$	$\sigma_{E,DEC}^2 = T_{DEC}(\sigma_{A,DEC}^2)$
误比特率	$P_{b,E,DET} = T_{DET}(P_{b,A,DET})$	$P_{b,E,DEC} = T_{DEC}(P_{b,A,DEC})$
保真度	$M_{E,DET} = T_{DET}(M_{A,DET})$	$M_{E,DEC} = T_{DEC}(M_{A,DEC})$
互信息	$I_{E,DET} = T_{DET}(I_{A,DET})$	$I_{E,DEC} = T_{DEC}(I_{A,DEC})$

表 4 中， $T_{DET}(\cdot)$ 表示检测器传递关系， $T_{DEC}(\cdot)$ 表示译码器传递关系；下标 E,DET 及 A,DET 分别表示检测器输出端及输入端传递参数，下标 E,DEC 及 A,DEC 分别表示译码器输出端及输入端传递参数。

在针对迭代接收机性能分析的性能建模中，单参数传递关系的输出与输入之间不存在直接计算公式，只能根据输入传递参数的初始值，采用仿真的方法获得输出传递参数，从而建立传递关系。

首先对检测器仿真，建立检测器的单参数传递关系。生成高斯分布的输入软信息，等效模型的噪声方差初值任选。检测器输入传递参数由噪声方差确定。由于一次仿真得到的输出传递参数只是其值域的一部分，因此改变噪声方差重新仿真，直到检测器输出传递参数在其值域内覆盖。接着对译码器仿真，建立译码器的单参数传递关系并获得具体性能指标。生成高斯分布的输入软信息，等效模型的噪声方差初值任选。译码器输入传递参数由噪声方差确定。由于一次仿真得到的输出传递参数只是其值域的一部分，因此改变噪声方差重新仿真，直到译码器输出传递参数在其值域内覆盖。存储译码器输出传递参数和具体性能指标。在表 4 所列 5 种传递参数中，互信息作为传递参数的性能建模被广泛应用，得到一批有价值的性能分析结论。Ten Brink^[27,28]利用互信息传递关系研究了 Turbo 码性能及迭代解调译码的性能。Tüchler^[3]在 2002 年将互信息传递关系用于单用户单天线的迭代接收机，分析了 2 类、5 种均衡器的性能。Li K^[29]在 2005 年利用互信息传递关系对最小均方误差及最大后验概率多用户检测器进行分析。

在针对迭代接收机性能优化的建模中，同样利用仿真的方法建立单参数传递关系。Narayanan^[25]

在 2001 年使用保真度传递关系评估磁介质信道上编码对部分响应系统收敛的影响。Tüchler^[23]研究了单参数传递关系, 研究表明互信息传递关系是顽健的传递关系。由于可公式化计算的检测器单参数传递函数无需通过仿真方法获得, 因此该传递关系是针对性能优化建模方法的研究重点。Ramon^[19]利用软信息的均值及方差对迭代接收机性能建模, 在检测器输入软信息高斯分布下, 根据式(1)和式(2)建立调制器的单参数传递关系^[1-3,19,20]为

$$(\bar{s}_k^{(i)}, v_k^{(i)}) = T_{MOD}(\mu_{A,DET}^{(i)}, (\sigma_{A,DET}^{(i)})^2) \quad (7)$$

其中, $T_{MOD}(\cdot)$ 表示调制器的传递函数。在 BPSK 调制情况下, 根据式(6)得到

$$L_{E,DET}^{(i)}(x_k) = (2\mu_k^{(i)} / (\sigma_{v,k}^{(i)})^2) s_k^{(i)} \quad (8)$$

检测器输出端关于 s_k 的软信息的均值和方差计算公式分别为

$$\begin{aligned} \mu_{E,DET}^{(i)} &= E\{L_{E,DET}^{(i)}(x_n) | x_n = 1\} \\ &= (2\mu_k^{(i)} / (\sigma_{v,k}^{(i)})^2) E\{s_k^{(i)} | x_n = s_k = 1\} \\ &= 2(\mu_k^{(i)})^2 / (\sigma_{v,k}^{(i)})^2 \\ (\sigma_{E,DET}^{(i)})^2 &= \text{var}\{L_{E,DET}^{(i)}(x_n)\} \\ &= (2\mu_k^{(i)} / (\sigma_{v,k}^{(i)})^2)^2 \text{var}\{s_k^{(i)}\} \\ &= 4(\mu_k^{(i)})^2 / (\sigma_{v,k}^{(i)})^2 = 2\mu_{E,DET} \end{aligned}$$

检测器的传递关系为

$$(\mu_{E,DET}^{(i)}, (\sigma_{E,DET}^{(i)})^2) = T_{DET}(\mathbf{H}, \sigma^2, \mu_{A,DET}^{(i)}, (\sigma_{A,DET}^{(i)})^2) \quad (9)$$

其中, $T_{MUD}(\cdot)$ 表示检测器的传递函数, 可以公式化计算并且将调制方式推广到高阶调制。由于利用了译码器输入端和输出端软信息的一致性条件, 检测器的传递关系是单参数传递关系。符号方差的均值为

$$\tilde{v}(\mu_{A,EQ}, \sigma_{A,EQ}^2) = \int_{-\infty}^{\infty} (1 - \tanh^2(l/2)) \phi_{\mu_{A,EQ}, \sigma_{A,EQ}^2}(l) dl \quad (10)$$

其中, $1 - \tanh^2(l/2)$ 表示 BPSK 调制下调制器输出符号方差, $\mu_{A,DET}$ 及 $\sigma_{A,DET}^2$ 分别表示检测器输入软信息的均值和方差, \tilde{v} 表示符号方差的均值。译码器软信息均值的传递关系为

$$\bar{\mu}_{E,DEC} = T_{DEC}(\bar{\mu}_{A,DEC}) \quad (11)$$

其中, $\bar{\mu}_{E,DEC}$ 及 $\bar{\mu}_{A,DEC}$ 分别表示译码器输出端及输入端软信息均值的平均。利用译码器输入端和输出端软信息高斯分布的特点, 通过仿真的方法获得传

递关系。

在表 4 所列 5 种传递参数中, 由于误比特率及保真度都是软信息均值的函数, 因此以误比特率及保真度为传递参数的检测器单参数传递关系也容易满足公式化计算的要求。误比特率或保真度作为传递参数的性能建模被广泛应用, 得到一批有价值的针对性能优化的性能建模方法。Lee^[4]在 2005 年研究迭代接收机的均衡器自适应系数时及 Sabbaghian^[24]在 2009 年研究迭代接收机停止迭代准则时, 建立了以误比特率为传递参数的单参数传递关系。Shepherd^[5]在 2006 年研究迭代接收机停止迭代准则时, 建立了以保真度为传递参数的单参数传递关系。在这些性能建模方法中, 检测器的传递关系都是通过公式计算的方法获得。由于误比特率及保真度都与软信息均值或方差联系, 这 2 种传递参数都可能与式(9)及式(11)结合, 形成新的公式计算方法。然而, 这种新方法尚未出现在公开可查文献, 该方法的性能也值得深入研究。

3.5.2 多参数传递关系

在针对迭代接收机链路联合设计的性能建模中, 互信息作为传递参数有 3 项优势: 互信息就是迭代接收机的速率, 也是链路联合设计的优化目标函数; 互信息较之均值、方差、误比特率、保真度等传递参数顽健^[23]; 性能提取通过互信息等等效噪声映射方法实现, 该方法已经得到理论证实和实际应用^[36-38]。然而, 以互信息作为传递参数的单参数传递关系需要通过仿真的方法实现。不难发现, 均衡器若以符号方差作为输入端附加传递参数、后验信干比作为输出端附加传递参数, 传递关系就可通过公式化计算的方法获得。因此合理选择均衡器的多个传递参数, 包括传递参数和附加传递参数, 均衡器的传递关系就可以通过公式化计算的方法获得输出传递参数。

由于采用附加传递参数, 这种传递关系被称为多参数传递关系^[19,20,26]。另外, 由于译码器单元组合的传递关系采用仿真的方法建立, 这种多参数传递关系也称为半公式化传递关系。Visoz^[20]和 Yuan^[26]的研究表明, 在对均衡器公式化建模后, 一方面可以对均衡器及解调器各自独立建立传递关系, 对译码器调制器联合建立传递关系, 另一方面也可以对均衡器独立建模, 对解调器译码器及调制器联合建立传递关系, 从而形成迭代接收机性能建模的 2 种半公式化方法。表 5 给出

了解调器独立建模的半公式化传递关系，其中包括均衡器传递关系、解调器传递关系及译码器调制器联合传递关系。

表 5 解调器独立建模的半公式化传递关系

建模单元	半公式化传递关系
均衡器	$\gamma_k^{(i)} = T_{EQ}(\mathbf{H}, \sigma^2, \mathbf{v}_s^{(i-1)})$
解调器	$I_{E,DEM}^{(i)} = T_{DEM}(\gamma_k^{(i)}, I_{A,DEM}^{(i)})$
译码器调制器联合	$(\bar{I}_{E,DEC}^{(i)}, \mathbf{v}_s^{(i)}) = T_{JDM}(\bar{I}_{A,DEC}^{(i)})$

表 5 中， $T_{EQ}(\cdot)$ 、 $T_{DEM}(\cdot)$ 及 $T_{JDM}(\cdot)$ 分别表示均衡器传递关系、解调器传递关系及译码器调制器联合传递关系； $\gamma_k^{(i)}$ 表示关于符号 s_k 的后验信干比， $\mathbf{v}_s^{(i-1)}$ 表示译码器调制器联合输出的符号方差； $I_{E,DEM}^{(i)}$ 表示解调器输出端 s_k 的第 q 个比特 x_q 与软信息 $L_{E,DEM}(x_q)$ 的互信息； $I_{A,DEM}^{(i)}$ 表示解调器输入端 x_q 与 $L_{A,DEM}(x_q)$ 的先验互信息； $\bar{I}_{E,DEC}^{(i)}$ 及 $\bar{I}_{A,DEC}^{(i)}$ 分别表示译码器调制器联合输出端及输入端的编码比特与软信息之间的平均互信息， $\bar{I}_{A,DEC}^{(i)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_{E,DEM}^{(i)}(L_{E,DEM}(x_n))$ 。根据式(5)，并利用均衡器输出符号的转移概率高斯分布的特点，可得均衡器的传递关系。这种传递关系在针对迭代接收机链路联合设计的性能建模中使用^[19,20]。利用解调器输出端符号 z_k 的每个比特通过并行且独立的高斯信道的特点，可得解调器关于 z_k 获得的互信息^[20-22]和解调器的传递关系。利用译码器输入端或输出端软信息高斯分布的特点，通过仿真的方法可获得译码器调制器联合传递关系。

表 6 给出了解调器非独立建模的半公式化传递关系，其中包括均衡器传递关系及解调器译码器调制器联合传递关系。

表 6 解调器非独立建模的半公式化传递关系

建模单元	半公式化传递关系
均衡器	$\gamma_k^{(i)} = T_{EQ}(\mathbf{H}, \sigma^2, \mathbf{v}_s^{(i-1)})$
解调器、译码器及调制器联合	$(\bar{I}_{E,JDD}^{(i)}, \mathbf{v}_s^{(i)}) = T_{JDD}(\bar{I}_{A,DEM}^{(i)})$

表 6 中， $T_{EQ}(\cdot)$ 表示均衡器传递关系， $T_{JDD}(\cdot)$ 表示解调器、译码器及调制器联合传递关系； $\bar{I}_{E,DEC}^{(i)}$ 及 $\bar{I}_{A,DEC}^{(i)}$ 分别表示解调器、译码器及调制器联合的输出端及输入端的编码比特与软信息之间的平均互

信息。 $\bar{I}_{A,DEC}^{(i)} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \text{LUT}(\gamma_k)$ ，其中， $\text{LUT}(\cdot)$ 是后验信干比的互信息函数。利用均衡器输出端符号转移概率高斯分布的特点，通过仿真的方法可以获得符号 s_k 的互信息为

$$\text{LUT}(\gamma_k) = Q - \frac{1}{2^Q} \sum_{s \in \mathcal{A}} E_{s|s_k} \left\{ \text{lb} \left(\frac{\sum_{s' \in \mathcal{A}} f(\hat{s}|s')}{f(\hat{s}|s)} \right) \right\}$$

根据均衡器等效模型，通过仿真的方法可以获得解调器、译码器及调制器联合传递关系。

上述多参数传递关系都是以互信息为传递参数。由于采用互信息等效信噪比映射的性能提取方法，这种性能建模方法精确度很高。然而，随着研究的深入进行，这种性能建模仍然面临 2 个问题：实际信道估计误差下的性能预测方法；均衡器传递关系在公式化计算过程中矩阵求逆运算比较复杂。Schoeneich^[8]研究了实际信道估计误差下的性能建模方法。Lalam^[31]提出利用匹配滤波逼近最小均方误差滤波，取得较好的预测效果。这种方法能有效降低计算复杂度。Ning B Z^[32]研究了半盲信道估计下的性能建模。Sand^[33]研究了数据辅助信道估计的迭代接收机性能建模。另外，Et-Tolba^[34]研究了功率控制及实际信道估计下的性能建模。这些性能建模方法都是结合信道估计研究的。

4 结束语

迭代接收机性能建模发展到现阶段，软信息高斯分布情况下的研究已经出现一些有价值的成果，但是对于非高斯分布情况下的工作还有待进一步研究。迭代接收机采用串行干扰抵消，使得排序靠后码块的软信息符合高斯分布不失为一种好方法。受到这种方法启发，可以考虑重新设计迭代接收机的一些参数，比如码块长度及编码速率，使得软信息服从高斯分布。另外，软信息非高斯分布情况下，需要对现有迭代接收机重新设计译码器，例如优化译码器在混合高斯分布等效模型下的性能。

在针对迭代接收机性能分析的建模中，互信息作为传递参数被认为是最顽健的并得到广泛采用。同时，检测器的性能提取大多采用软信息独立同分布的方法，单参数的软信息传递关系通过仿真的方法获得。然而，在迭代接收机采用最大后验概率均衡器的情况下，这种性能建模方法的可行性研究并未开始。除此之外，在迭代接收机采用高阶解调器

的情况下, 这种性能建模方法的精确度受到影响, 但是该问题的解决方法公开可查的文献中并未出现。因此, 针对迭代接收机性能分析, 互信息演化法仍有诸多问题需要解决。

在针对迭代接收机性能优化的建模中, 半公式化传递关系由于检测器的传递关系可以通过公式化计算获得而成为研究的重点。软信息的均值、软信息的方差、误比特率及保真度等传递参数由于可以建立检测器的公式化计算而成为半公式化传递关系的传递参数。然而, 性能提取技术也只能针对这些传递参数做平均运算, 精确度无法保证。若建立检测器的多参数传递关系, 可以采用互信息等效信噪比映射法做性能提取, 理论和实践都已证明该方法的價值。然而, 由于涉及大量查找表操作以及后验信干比计算, 时延无法避免。

在针对迭代接收机链路联合设计的建模中, 互信息作为传递参数在跟踪收敛行为的精确程度上最优。同时, 互信息等效信噪比映射方法也能得以应用, 是一种精确的性能提取技术。通过引入符号方差作为辅助传递参数, 检测器的传递关系可以通过公式化计算的方法获得。然而, 计算后验信干比涉及矩阵求逆, 高效的矩阵运算方法, 例如矩阵插值, 将有效降低计算复杂度。除此之外, 在实际信道估计方法下, 性能建模方法的研究面临一系列的问题, 需考虑信道估计误差对性能建模的影响。因此, 互信息作为传递参数的半公式化性能建模仍需深入研究。

参考文献:

- [1] WANG X D, VINCENT P H. Iterative (Turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(7):384 - 395.
- [2] WANG D M, GAO X Q, YOU X H. Low complexity Turbo receiver for multi-user STBC block transmission systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(10):2625-2632.
- [3] TÜCHLER M, KOETTER R, SINGER A. Turbo equalization: principles and new results[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(5):754-767.
- [4] LEE S-J, SINGER A, SHANBHAG N. Linear Turbo equalization analysis via BER transfer and EXIT charts[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8):2883-2896.
- [5] SHEPHERD D, BRÄNNSTRÖM F, REED M. Fidelity charts and stopping/termination criteria for iterative multiuser detection[A]. 4th International Symposium on Turbo Codes & Related Topics Munich[C]. German, 2006.
- [6] GAO X Q, YOU X H, JIANG B, *et al.* Unifying eigen-mode MIMO transmission[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 52(12):2269 - 2278.
- [7] XUE Y, SUN Q, JIANG B, *et al.* Link adaptaton scheme for uplink MIMO transmission with Turbo receivers[A]. IEEE International Conference on Vehicular Technology[C]. Seoul, Korea, 2014.
- [8] SCHOENEICH H, BERBERANA I, GRIEGER M, *et al.* Interference control in LTE-advanced: an ARTIST4G overview[A]. Future Network & Mobile Summit 2012 Conference Proceedings[C]. Berlin, Germany, 2012.
- [9] IKUNO J, MEHLFÜHRER C, RUPP M. A novel link error prediction model for OFDM systems with HARQ[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Kyoto, Japan, 2011.
- [10] KARJALAINEN J, CODREANU M, TÖLLI A, *et al.* EXIT chart-based power allocation for iterative frequency domain MIMO detector[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4): 1624-1641.
- [11] LU B, WANG X D, NARAYANAN K. LDPC-based space-time coded OFDM systems over correlated fading channels: performance analysis and receiver design[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(1):74 - 88.
- [12] YUAN X J, LI P, KAVCIC A. Achievable rates of MIMO-ISI systems with linear precoding and iterative LMMSE detection[A]. IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings[C]. Saint Petersburg, Russia, 2011.
- [13] FU M. Stochastic analysis of Turbo decoding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(1):81-100.
- [14] RICHARDSON T. The geometry of Turbo-decoding dynamics[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(1):9-23.
- [15] RICHARDSON T, URBANKE R. The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2):599 - 618.
- [16] RICHARDSON T, SHOKROLLAHI M, URBANKE R. Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2):619-637.
- [17] NARAYANAN K, WANG X D, YUE G S. Estimating the PDF of the SIC-MMSE equalizer output and its applications in designing LDPC codes with turbo equalization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(1):278 - 287.
- [18] GAMAL H, HAMMONS R. Analyzing the turbo decoder using the Gaussian approximation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2):671-686.
- [19] RAMON V, HERZET C, VANDORPE L. A semi-analytical method for predicting the performance and convergence behavior of a multi-user turbo equalizer /demapper[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(3):1104-1117.
- [20] VISOZ R, BERTHET A O, LALAM M. Semi-analytical performance prediction method for iterative MMSE-IC multiuser MIMO joint decoding[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(9):2576 - 2589.
- [21] CAIRE G, TARICCO G, BIGLIERI E. Bit-Interleaved coded modulation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44(3): 927-946.

- [22] HERMOSILLA C, SZCZECIŃSKI L. Performance evaluation of linear turbo receivers using analytical extrinsic information transfer functions[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005, 6:892-905.
- [23] JIANG M L, PRASAD N, YUE G S, *et al.* Efficient link adaption for precoded multi-rank transmission and turbo SIC receivers[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. Kyoto, Japan, 2011.
- [24] TÜCHLER M, TEN BRINK S, HAGENAUER J. Measures for tracing the convergence of iterative decoding algorithms[A]. IEEE/ITG Conference on Source Channel Coding[C]. Berlin, Germany, 2002.
- [25] SABBAGHIAN M, FALCONER D. An analytical approach for finite block length performance analysis of Turbo frequency domain equalization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(3): 1292-1301.
- [26] NARAYANAN K. Effect of precoding on the convergence of turbo equalization for partial response channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(4):686-698.
- [27] YUAN X J, GUO Q H, WANG X D, *et al.* Evaluation analysis of low-cost iterative equalization in coded linear systems with cyclic prefixes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(2):301-310.
- [28] BRUENINGHAUS K, ASTÉLY D, *et al.* Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems[A]. IEEE 16th International Symposium on in Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. Berlin, Germany, 2005.
- [29] TSAI S. Effective-SNR mapping for modeling frame error rates in multiple-statechannels[EB/OL].ftp://ftp.3gpp2.org/TSGC/Working/2003/2003-05-SanDiego/TSG-C-2003-05-SanDiego/WG3/WG3Call,2003.04.29/C30-20030429-010_Ericsson_Effective_SNR_Mapping.PDF,2014.
- [30] WAN L, TSAI S, MAGNUS A. A fading-insensitive performance metric for a unified link quality model[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Las Vegas, USA, 2006.
- [31] TEN B S. Convergence of iterative decoding[J]. IEE Electronics Letters, 1999, 35(10):806-808.
- [32] TEN B S. Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(10):1727 - 1737.
- [33] LI K, WANG X D. EXIT chart analysis of Turbo multiuser detection[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(1):300-311.
- [34] JIANG F, XUE Y, JIANG B, *et al.* Average effective SNR mapping in LTE-A uplink[A]. The 7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)[C]. Kunming, China, 2012.
- [35] LALAM M, VISOZ R, BERTHET A O. A fast prediction method to optimize link adaptation for interference cancellation receivers[A]. IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)[C]. Reykjavik, Iceland, 2008.
- [36] NING B Z, VISOZ R, BERTHET A O. Semi-analytical performance prediction method for iterative MMSE-IC detection and semi-blind channel estimation[A]. IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Budapest, Hungary, 2011.
- [37] SAND S, MENSING C, DAMMANN A. Transfer chart analysis of iterative OFDM receivers with data aided channel estimation[A]. The 3rd COST 289 Workshop[C]. Aveiro, Portugal, 2012.
- [38] ET-TOLBA M, SAOUDI S, VISOZ R. Fast performance prediction of power controlled HSUPA with channel estimation[EB/OL]. <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2012/1/148>, 2012.

作者简介:



薛昀 (1981-), 男, 江苏靖江人, 东南大学博士生, 主要研究方向为迭代接收机性能建模及链路自适应传输技术。



江彬 (1978-), 男, 江苏海门人, 东南大学副教授, 主要研究方向为多波束卫星移动通信及大规模 MIMO 无线通信理论与技术。



高西奇 (1967-), 男, 安徽灵璧人, 东南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为空时无线通信理论与技术、宽带多载波传输与多址技术、现代信号处理及其在移动通信中的应用。