

## 存在信道反馈延迟时 Turbo-BLAST 系统的自适应功率分配算法

于晓丹 陈小敏\* 谭伟 虞湘宾  
(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

**摘要:** 该文针对信道反馈有延迟的 Turbo-BLAST 系统, 以误比特率(Bit Error Rate, BER)为优化目标, 提出次优和最优两种自适应功率分配算法。通过系统建模和性能分析, 推导出系统瞬时信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)的条件概率密度函数, 利用数学变换得到信道反馈有延迟时系统 BER 的表达式。发送端在总功率约束条件下, 分别采用拉格朗日极值法和牛顿迭代法求解功率分配矩阵的次优解与最优解。接收端采用基于迫零(Zero Forcing, ZF)准则的软干扰抵消算法进行迭代检测。仿真结果表明, 和等功率分配相比, 采用该文所提两种算法均可改善系统的 BER 性能。最优功率分配算法以增加计算复杂度为代价更好地改善了系统的 BER 性能, 而接收端的迭代检测可进一步改善系统性能。

**关键词:** Turbo-BLAST 系统; 反馈延迟; 估计信噪比; 自适应功率分配; 迭代检测

**中图分类号:** TN914

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2014)04-0787-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2013.00872

## Adaptive Power Allocation Algorithm for Turbo-BLAST System with Channel Feedback Delay

Yu Xiao-dan Chen Xiao-min Tan Wei Yu Xiang-bin

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The suboptimal and optimal adaptive transmit power allocation algorithms are proposed to minimize the Bit Error Rate (BER) performance for Turbo-BLAST system with channel feedback delay. The conditional probability density function of the instantaneous Signal Noise Ratio (SNR) is deduced by system modeling and performance analysis. The system BER can be computed using mathematical transformation. At the transmitter, with the total transmit power constraint condition, the suboptimal and optimal transmit power matrix can be calculated by using the Lagrange multiplier method and Newton iteration technique, respectively. At the receiver, the iterative soft interference cancellation algorithm based on Zero Forcing (ZF) rule is used to detect the received symbols. Simulation results show that the proposed algorithms can improve the system BER performance. The optimal power allocation algorithm can improve BER performance more at the cost of increasing the computational complexity. The system performance can be further improved by iterative detection.

**Key words:** Turbo-BLAST system; Feedback delay; Estimated SNR; Adaptive power allocation; Iterative detection

### 1 引言

在 Turbo-BLAST 系统中采用链路自适应技术可以有效改善系统性能<sup>[1,2]</sup>。其中, 发送功率分配是一种简单可行的方法, 根据不同的优化目标, 可选用不同的发送功率分配方案。以信道容量为优化目标的注水功率分配算法可显著提高系统容量<sup>[3-5]</sup>, 而以系统误比特率(Bit Error Rate, BER)为优化目标的自适应功率分配算法可以有效改善系统的

BER 性能<sup>[6-8]</sup>。

近年来, 自适应功率分配算法得到广泛应用<sup>[9,10]</sup>, 以最小化系统BER为优化目标, 文献[6,7]分别提出一种基于迫零(Zero Forcing, ZF)和最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)检测的自适应功率分配算法; 文献[8]给出了一种基于MMSE软干扰抵消迭代检测的发送功率分配方案, 较大程度改善了系统的BER性能。功率分配的性能取决于信道状态信息(Channel State Information, CSI), 而在实际应用中信道信息的反馈存在时延或误差<sup>[11]</sup>。已有文献针对反馈时延对系统性能的影响做了研究<sup>[12,13]</sup>, 但没有给出反馈时延对功率分配性能的影响。

2013-06-21 收到, 2013-10-12 改回

南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2012075)和自然科学基金(61172078)资助课题

\*通信作者: 陈小敏 chenxm402@nuaa.com

为提高功率分配算法的工程应用价值, 本文针对存在信道反馈延迟的Turbo-BLAST系统, 推导出系统BER的表达式, 在总功率约束条件下, 以BER为优化目标, 提出基于拉格朗日极值法的次优功率分配方案和基于牛顿迭代法的最优功率分配方案。仿真结果表明, 本文推导的BER表达式可以有效评估反馈时延对系统性能的影响, 提出的两种自适应功率分配算法均可改善系统的BER性能。

## 2 存在信道反馈延迟的 Turbo-BLAST 系统模型

Turbo-BLAST 系统有  $M$  根发送天线和  $N$  根接收天线, 比特流经过编码、调制、空时变换和功率加载后发送出去, 信道为准静态瑞利衰落, 某一时刻接收信号可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$  为发送信号,  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$  为接收信号,  $\mathbf{H}$  为信道矩阵, 其元素  $h_{ji} \sim CN(0, 1)$  表示从第  $i$  根发射天线到第  $j$  根接收天线的信道增益,  $CN(\mu, \sigma^2)$  表示均值为  $\mu$  方差为  $\sigma^2$  的复高斯分布。  $\mathbf{P} = \text{diag}(\sqrt{P_1}, \sqrt{P_2}, \dots, \sqrt{P_M})$  表示功率分配矩阵, 满足总功率约束条件  $\sum_{i=1}^M P_i = 1$ ,  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_N)^T$  表示加性高斯白噪声, 均值为 0, 方差为  $N_0$ 。系统模型如图 1 所示。

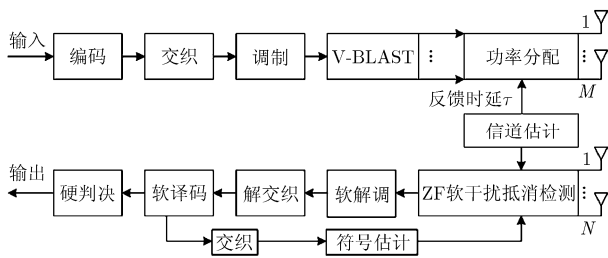


图1 信道反馈有延迟时的系统模型

在  $t$  时刻, 假设接收端得到完全的信道矩阵  $\hat{\mathbf{H}}$ , 对应的估计信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)为  $\hat{\gamma}$ , 并通过时延为  $\tau$  的反馈链路将此  $\hat{\mathbf{H}}$  反馈给发送端, 在  $(t + \tau)$  时刻的实际信道矩阵为  $\mathbf{H}$ 。  $\hat{\mathbf{H}}$  和  $\mathbf{H}$  之间满足关系<sup>[1]</sup>:

$$\mathbf{H} = \rho \hat{\mathbf{H}} + \boldsymbol{\Xi} \quad (2)$$

其中  $\rho = J_0^2(2\pi f_d \tau)$  是相关系数,  $J_0$  为第 1 类零阶贝塞尔函数,  $f_d$  为最大多普勒频移。  $\boldsymbol{\Xi}$  是估计误差矩阵, 其元素  $\varepsilon_{ij} \sim CN(0, 1 - \rho)$  是独立同分布的复高斯变量。

## 3 信道反馈有延迟条件下 Turbo-BLAST 系统的 BER 推导

接收端采用基于 ZF 准则的软干扰抵消算法进行检测, 检测用的权向量矩阵为  $\mathbf{G} = (\mathbf{H}\mathbf{P})^+$ <sup>[6]</sup>, 则发送信号的估计为

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{x} + \mathbf{G}\mathbf{n} = \mathbf{x} + (\mathbf{H}\mathbf{P})^+ \mathbf{n} \quad (3)$$

其中,  $(\cdot)^+$  表示矩阵的广义逆。定义  $\tilde{\mathbf{e}} = (\mathbf{H}\mathbf{P})^+ \mathbf{n}$  为等效噪声,  $[\varepsilon\{\tilde{\mathbf{e}}\tilde{\mathbf{e}}^*\}]_{k_i k_i} = N_0 [(\mathbf{H}\mathbf{P})^+ [(\mathbf{H}\mathbf{P})^+]^H]_{k_i k_i}$  为第  $k_i$  根发送天线上的等效噪声功率,  $[\cdot]_{kk}$  表示矩阵的第  $k$  行第  $k$  列个元素。假设来自  $M$  根发送天线的平均发送功率为  $E_s$ , 则平均 SNR 为  $\bar{\gamma} = E_s/N_0$ , 第  $k_i$  个符号的 SNR 可表示为

$$\gamma_{k_i} = \frac{\bar{\gamma}}{[(\mathbf{H}\mathbf{P})^H (\mathbf{H}\mathbf{P})^{-1}]_{k_i k_i}} \quad (4)$$

定义  $\mathbf{Z} = (\sqrt{2}(\mathbf{H}\mathbf{P})^H)(\sqrt{2}(\mathbf{H}\mathbf{P})) = 2(\mathbf{H}\mathbf{P})^H (\mathbf{H}\mathbf{P})$ , 由于  $(\mathbf{H}\mathbf{P})$  的行向量均服从  $CN(0, \mathbf{P}^2)$ 。矩阵  $\mathbf{Z}$  可看作复威沙特矩阵<sup>[14]</sup>, 满足自由度为  $N$  的威沙特分布  $W_M(N, \boldsymbol{\Sigma})$ ,  $\boldsymbol{\Sigma} = 2\mathbf{P}^2$ , 因此式(4)可写成

$$\gamma_{k_i} = \frac{\bar{\gamma}}{2[\mathbf{Z}^{-1}]_{k_i k_i}} = \frac{\bar{\gamma}}{2} \frac{\det \mathbf{Z}}{\det(\mathbf{Z}_{(-k_i, -k_i)})} = \frac{\bar{\gamma}}{2} \det \mathbf{Z}_{k_i k_i}^{sc} \quad (5)$$

其中  $\det(\cdot)$  表示矩阵的行列式,  $[\cdot]_{(-k_i, -k_i)}$  表示矩阵去掉第  $k$  行第  $k$  列后的矩阵,  $[\cdot]_{kk}^{sc}$  表示矩阵  $[\cdot]_{(-k, -k)}$  的 Schur 补。由于  $\det \mathbf{Z}_{k_i k_i}^{sc}$  服从  $W_M(N - M + 1, \boldsymbol{\Sigma}_{k_i k_i}^{sc})$  分布, 变量  $b = \det \mathbf{Z}_{k_i k_i}^{sc}$  的概率密度函数可表示为

$$f(b) = \frac{\exp(-b/\boldsymbol{\Sigma}_{k_i k_i}^{sc})}{\boldsymbol{\Sigma}_{k_i k_i}^{sc} \Gamma(N - M + 1)} \left( \frac{b}{\boldsymbol{\Sigma}_{k_i k_i}^{sc}} \right)^{N-M} \quad (6)$$

其中  $\boldsymbol{\Sigma}_{k_i k_i}^{sc} = \frac{\det(\boldsymbol{\Sigma})}{\det(\boldsymbol{\Sigma}_{(-k_i, -k_i)})}$ ,  $\Gamma(a) = \int_0^\infty e^{-t} t^{a-1} dt$  为伽马函数。由式(5)可知,  $\gamma_{k_i} = \frac{\bar{\gamma}}{2} \det \mathbf{Z}_{k_i k_i}^{sc} = \frac{\bar{\gamma}}{2} b$ , 则  $\gamma_{k_i}$  的概率密度函数为

$$\begin{aligned} f(\gamma_{k_i}) &= \frac{\exp(-\gamma_{k_i}/(\bar{\gamma}\boldsymbol{\Sigma}_{k_i k_i}^{sc}/2))}{\bar{\gamma}\boldsymbol{\Sigma}_{k_i k_i}^{sc} \Gamma(N - M + 1)} \left( \frac{\gamma_{k_i}}{\bar{\gamma}\boldsymbol{\Sigma}_{k_i k_i}^{sc}} \right)^{N-M} \\ &= \frac{\gamma_{k_i}^{K-1}}{\Gamma(K)} \left( \frac{P_{k_i}^{-1}}{\bar{\gamma}} \right)^K \exp\left(-\gamma_{k_i} \frac{P_{k_i}^{-1}}{\bar{\gamma}}\right), \gamma_{k_i} \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $2/\boldsymbol{\Sigma}_{k_i k_i}^{sc} = 2[\boldsymbol{\Sigma}^{-1}]_{k_i k_i} = P_{k_i}^{-1}$ ,  $K = N - M + 1$ , 由式(7)可知,  $\gamma_{k_i}$  服从自由度为  $2(N - M + 1)$  的卡方分布。

由于发送端需要根据  $t$  时刻的估计信道矩阵  $\hat{\mathbf{H}}$  进行自适应的功率分配, 而功率加载后的信号在  $(t + \tau)$  时刻发送出去时经历的实际信道为  $\mathbf{H}$ , 因此有必要研究不同时刻 SNR 之间的关系, 并在此基础上推导系统 BER 的表达式。

根据  $\widehat{\mathbf{H}}$  和  $\gamma_{k_i}$  的表达式, 可以得到估计 SNR, 用  $\hat{\gamma}_{k_i}$  表示。由于  $\mathbf{H}$  和  $\widehat{\mathbf{H}}$  服从同一分布, 所以  $\hat{\gamma}_{k_i}$  和  $\gamma_{k_i}$  服从同一复高斯分布, 其概率密度函数  $f(\hat{\gamma}_{k_i})$  可由式(7)得到。根据文献[15], 先求出  $\hat{\gamma}_{k_i}$  和  $\gamma_{k_i}$  的联合概率密度函数  $f(\gamma_{k_i}, \hat{\gamma}_{k_i})$ , 进而得到条件概率密度函数  $f(\gamma_{k_i} | \hat{\gamma}_{k_i})$ :

$$f(\gamma_{k_i} | \hat{\gamma}_{k_i}) = \frac{f(\gamma_{k_i}, \hat{\gamma}_{k_i})}{f(\hat{\gamma}_{k_i})} = \frac{1}{1-\rho} \frac{P_{k_i}^{-1}}{\bar{\gamma}} \left( \frac{\gamma_{k_i}}{\rho \hat{\gamma}_{k_i}} \right)^{(K-1)/2} \cdot I_{K-1} \left( \frac{2P_{k_i}^{-1} \sqrt{\rho \gamma_{k_i} \hat{\gamma}_{k_i}}}{(1-\rho)\bar{\gamma}} \right) \cdot \exp \left( -\frac{P_{k_i}^{-1}(\gamma_{k_i} + \rho \hat{\gamma}_{k_i})}{(1-\rho)\bar{\gamma}} \right) \quad (8)$$

已知采用 M-QAM 调制时第  $k_i$  个发送符号的 BER 表达式<sup>[6]</sup>, 则  $t$  时刻的系统瞬时 BER 可表示为

$$\begin{aligned} \text{BER}(\hat{\gamma}_{k_i}) &= \int_0^\infty \text{BER}(\gamma_{k_i}) f(\gamma_{k_i} | \hat{\gamma}_{k_i}) d\gamma_{k_i} \\ &= c_1 \left( \frac{P_{k_i}^{-1}}{c_2(1-\rho)\bar{\gamma} + P_{k_i}^{-1}} \right)^K \\ &\quad \cdot \exp \left( -\frac{c_2 \rho \hat{\gamma}_{k_i} P_{k_i}^{-1}}{c_2(1-\rho)\bar{\gamma} + P_{k_i}^{-1}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $c_1 = 0.2$ ,  $c_2 = 1.6/(2^R - 1)$ ,  $R$  为每个符号对应的比特数目。将  $\hat{\gamma}_{k_i}$  的表达式代入式(9)得

$$\begin{aligned} \text{BER}_{k_i} &= c_1 \left( \frac{1}{c_2(1-\rho)\bar{\gamma} P_{k_i} + 1} \right)^K \\ &\quad \cdot \exp \left( -\frac{c_2 \rho \bar{\gamma} P_{k_i}}{\|\hat{v}_{k_i}\|^2 (c_2(1-\rho)\bar{\gamma} P_{k_i} + 1)} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $\|\hat{v}_{k_i}\|^2 = \left[ \left( \widehat{\mathbf{H}}^H \widehat{\mathbf{H}} \right)^{-1} \right]_{k_i k_i}$ 。假设各发送天线之间相互独立, 并且不考虑传播误差的影响, 则系统总 BER 可近似为所有符号瞬时 BER 的数学平均:

$$\text{BER} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{BER}_{k_i} \quad (11)$$

本节推导出了信道反馈有延迟时系统 BER 的表达式, 下面将在总功率约束条件下以 BER 为优化目标, 分别给出次优和最优的功率分配矩阵的求解过程。

## 4 信道反馈有延迟条件下的自适应发送功率分配方案

### 4.1 次优的自适应功率分配算法

在总发送功率约束条件下, 以系统总 BER 为优化目标的约束优化问题可以描述为

$$\left. \begin{aligned} \min_{P_{k_i}} \text{BER} &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{BER}_{k_i} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^M P_i &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)的约束优化问题可以采用拉格朗日极值法求解, 则代价函数可表示为

$$J(P_1, P_2, \dots, P_M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{BER}_{k_i} + \lambda \left( \sum_{i=1}^M P_i - 1 \right) \quad (13)$$

其中  $\lambda$  是拉格朗日乘子。令  $\partial J / \partial P_i = 0$ , 可得到  $M$  个关于  $P_{k_i}$  的方程, 解方程便可得到功率分配矩阵。考虑到直接求解比较困难且无法给出功率分配矩阵的闭式解。分析式(10)可知, 分子中  $c_2(1-\rho)\bar{\gamma}$  相比 1 要小得多, 因此忽略  $c_2(1-\rho)\bar{\gamma} P_{k_i}$  中  $P_{k_i}$  的影响, 将其看作等功率分配矩阵的元素, 使  $P_{k_i} = 1/M$ , 得到系统瞬时 BER 的近似值:

$$\begin{aligned} \text{BER}_{k_i} &= c_1 \left( \frac{1}{c_2(1-\rho)\bar{\gamma}/M + 1} \right)^K \\ &\quad \cdot \exp \left( -\frac{c_2 \rho \bar{\gamma} P_{k_i}}{\|\hat{v}_{k_i}\|^2 (c_2(1-\rho)\bar{\gamma}/M + 1)} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

利用式(14)重新构造代价函数, 便可得到次优的功率分配矩阵和拉格朗日乘子:

$$\left. \begin{aligned} P_{k_i} &= -\frac{\|\hat{v}_{k_i}\|^2 (c_2(1-\rho)\bar{\gamma}/M + 1)}{c_2 \rho \bar{\gamma}} \\ &\quad \cdot \ln \left( \frac{M \lambda \|\hat{v}_{k_i}\|^2}{c_1 c_2 \rho \bar{\gamma}} (c_2(1-\rho)\bar{\gamma}/M + 1)^{K+1} \right) \\ \lambda &= \exp \left( -\left[ \frac{c_2 \rho \bar{\gamma}}{c_2(1-\rho)\bar{\gamma}/M + 1} + \sum_{i=1}^M \|\hat{v}_{k_i}\|^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cdot \ln \left( \frac{M \|\hat{v}_{k_i}\|^2}{c_1 c_2 \rho \bar{\gamma}} (c_2(1-\rho)\bar{\gamma}/M + 1)^{K+1} \right) \right] \right) \\ &\quad \left. / \left( \sum_{i=1}^M \|\hat{v}_{k_i}\|^2 \right) \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

### 4.2 最优的自适应功率分配算法

本节采用牛顿迭代法计算发送功率的最优解。

$$\text{令 } f = \text{BER} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{BER}_{k_i}, h = \sum_{i=1}^M P_i - 1, g_i = -P_i,$$

则以系统总 BER 为优化目标的 KKT 优化问题可以描述为

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & f \\ \text{s.t.} \quad & g_i < 0, h = 0 \\ & \nabla f + \sum \mu_i \nabla g_i + \lambda \nabla h = 0 \\ & \mu_i \geq 0 \\ & \mu_i g_i = 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

其中  $\lambda'$  表示拉格朗日乘子。由于  $P_i > 0$ , 即  $\mu_i = 0$ 。则式(16)简化为

$$\left( \frac{1}{c_2(1-\rho)\bar{\gamma}P_{k_i} + 1} \right)^{K+2} \exp \left( -\frac{c_2\rho\bar{\gamma}P_{k_i}}{\|\hat{v}_{k_i}\|^2 (c_2(1-\rho)\bar{\gamma}P_{k_i} + 1)} \right) \cdot \left( \frac{c_2\rho\bar{\gamma}}{\|\hat{v}_{k_i}\|^2} + c_2(1-\rho)\bar{\gamma}K(c_2(1-\rho)\bar{\gamma}P_{k_i} + 1) \right) = \frac{M\lambda'}{c_1} \quad (17)$$

对式(17)等号两边取对数, 可得代价函数:

$$-(K+2)\lg(sP_{k_i} + 1) + \frac{-wP_{k_i}}{\|\hat{v}_{k_i}\|^2 (sP_{k_i} + 1)} + \lg \left( \frac{w}{\|\hat{v}_{k_i}\|^2} + sK(sP_{k_i} + 1) \right) = \lambda'_1 \quad (18)$$

其中  $\lambda'_1 = \lg(M\lambda'/c_1)$ ,  $s = c_2(1-\rho)\bar{\gamma}$ ,  $w = c_2\rho\bar{\gamma}$ 。利用牛顿迭代法求解式(18)便可得到功率分配矩阵的最优解。

### 4.3 复杂度分析

本节给出求解发送功率分配矩阵次优解与最优解的计算复杂度比较, 如表 1 所示。

表 1 求解次优解与最优解的复杂度比较

算法	一次偏导	二次偏导	矩阵求逆	矩阵乘法	矩阵减法
次优算法(次)	1	-	-	-	-
最优算法(次)	1	(2M + 1)	1	1	1

从表 1 可以看出, 次优功率分配算法虽对 BER 做了近似, 但其计算复杂度相比于最优功率分配算法大大降低。

## 5 仿真结果

本节通过仿真实验给出系统的 BER 性能, 以验证所提算法的有效性。在图 2-图 3 的仿真中, 信道是准静态瑞利衰落, 假设接收端完全已知信道状态

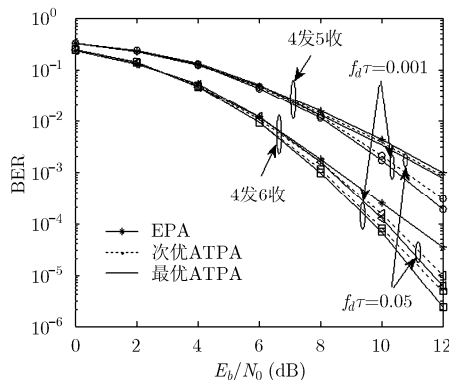


图 2 迭代次数不同时次优/最优功率分配算法与等功率算法的性能比较

信息。发送端采用(2,1,2)卷积编码, 4-QAM 调制, 接收端采用基于 ZF 准则的软干扰抵消检测, BCJR 译码。iter 表示迭代次数,  $f_d\tau$  表示归一化反馈时延, EPA 表示等功率分配算法, 最优\次优 ATPA 表示最优\次优功率分配算法。

图 2 给出了迭代次数为 1,  $f_d\tau$  等于 0.05, 0.001 时 Turbo-BLAST 系统的 BER 性能曲线, 天线配置分别为 4 发 5 收和 4 发 6 收。仿真目的是验证本文所提的两种功率分配算法的有效性, 以及接收天线数和归一化反馈时延对系统 BER 性能的影响。

从图 2 可以看出, 和等功率分配相比, 采用本文所提的两种功率分配算法均可明显改善系统性能, 在  $BER = 10^{-4}$ ,  $f_d\tau = 0.001$ , 接收天线数为 6 时, 采用最优功率分配算法要比采用等功率算法提高约 1.2 dB, 比采用次优功率分配算法提高约 0.3 dB。另外, 系统性能随着接收天线数目的增大, 归一化反馈时延  $f_d\tau$  的降低而逐渐变好, 说明系统的接收分集越大系统性能越好, 并且可以有效反映归一化反馈时延对系统 BER 性能的影响, 与理论预期结果一致。

图 3 针对 4 发 6 收,  $f_d\tau = 0.001$  的 Turbo-BLAST 系统, 给出了 BER 性能曲线。目的是比较在信道反馈有延迟的情况下, 迭代检测次数对系统 BER 性能的影响。

从图 3 可以看出, 接收端的迭代检测算法可进一步改善系统的 BER 性能, 无论对次优的功率分配算法还是最优的功率分配算法, 随着迭代次数的增加, 系统的 BER 性能均得到了改善。这说明本文所提算法在信道反馈有延迟时仍然是有效的。

## 6 结束语

针对信道反馈有延迟的 Turbo-BLAST 系统, 提出次优和最优两种自适应功率分配算法, 通过仿真验证了所提算法的有效性。最优功率分配方案可

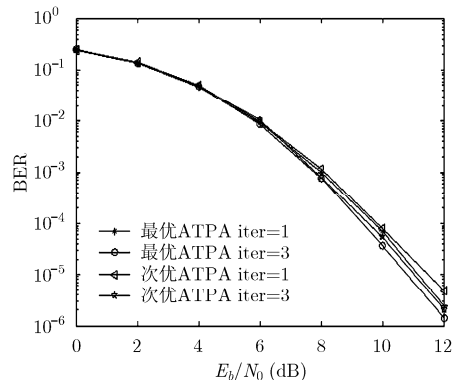


图 3 迭代次数对最优与次优 ATPA 算法性能的影响

以显著改善系统的 BER 性能, 次优功率算法具有较低的算法复杂度, 基于 ZF 的软干扰抵消迭代检测算法进一步改善了系统的 BER 性能。由于本文接收端采用的检测基于 ZF 准则, 虽可抑制信号干扰, 但同时也损失了部分有用信息, 因此, 在以后的工作中, 将进一步研究信道反馈有延迟情况下, 基于 MMSE 检测的自适应功率分配算法。

### 参考文献

- [1] Chen Xiao-min, Yu Xiang-bin, Zhu Qiu-ming, *et al.* Water-filling power allocation scheme for Turbo-BLAST system with imperfect channel state information[C]. IEEE 4th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications, Beijing, 2011: 611-614.
  - [2] Sellathurai M and Haykin S. Turbo-BLAST for wireless communications: theory and experiments[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(10): 2538-2546.
  - [3] 李晓辉, 易克初, 刘乃安. 一种MIMO系统中的新型资源分配算法[J]. *电路与系统学报*, 2006, 11(5): 84-87.  
Li Xiao-hui, Yi Ke-chu, and Liu Nai-an. A novel resource allocation algorithm for MIMO system[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2006, 11(5): 84-87.
  - [4] 姜永权, 刘乃安, 沈民奋, 等. MIMO系统一种新的功率分配算法及容量分析[J]. *电子学报*, 2007, 35(9): 1749-1753.  
Jiang Yong-quan, Liu Nai-an, Shen Min-fen, *et al.* A novel power allocation algorithm for MIMO system and capacity analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(9): 1749-1753.
  - [5] Kostina V and Loyka S. Optimal power and rate allocation for coded V-BLAST: instantaneous optimization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(10): 2841-2850.
  - [6] Nam Seung-h, Shin Oh-s, and Lee Kwang-b. Transmit power allocation for a modified V-BLAST system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2004, 52(7): 1074-1080.
  - [7] 许威, 赵春明, 史志华, 等. MIMO系统中基于ZF/MMSE检测的自适应功率分配方案[J]. *电子学报*, 2008, 36(10): 1891-1897.  
Xu Wei, Zhao Chun-ming, Shi Zhi-hua, *et al.* Adaptive power allocation for ZF/MMSE detected MIMO systems[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(10): 1891-1897.
  - [8] 唐万斌, 张亮, 李少谦. V-BLAST系统中采用发射功率分配的MMSE迭代软干扰抵消算法[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(9): 1640-1644.  
Tang Wan-bin, Zhang Liang, and Li Shao-qian. MMSE iterative soft interference cancellation algorithm using transmit power allocation scheme in V-BLAST system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(9): 1640-1644.
  - [9] Karami M and Beaulieu N C. Channel adaptive power allocation and pilot optimization for OFDM systems[C]. IEEE Global Communications Conference on Wireless Communications, Anaheim, CA, 2012: 4893-4899.
  - [10] Heo Ayoung, Cho Yeon-j, Jin Seung-r, *et al.* Adaptive relay selection and power allocation for hybrid relay systems[C]. International Conference on Future Generation Communication Technology, London, 2012: 117-120.
  - [11] Zhou S L and Giannakis G B. Optimal transmitter eigen-beamforming and space-time block coding based on channel mean feedback[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(10): 2599-2613.
  - [12] 赵爽, 杨鸿文. 时变瑞利信道下反馈时延对选择发送分集性能的影响[J]. *北京邮电大学学报*, 2009, 32(4): 94-99.  
Zhao Shuang and Yang Hong-wen. The impact of feedback delay on the performance of selective transmit diversity under time-varying Rayleigh channel[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2009, 32(4): 94-99.
  - [13] Guharoy S and Mehta N B. Joint evaluation of channel feedback schemes, rate adaptation, and scheduling in OFDMA downlinks with feedback delays[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(4): 1719-1732.
  - [14] Gore D A, Jr Heath R W, and Paulraj A J. Transmit selection in spatial multiplexing systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(11): 491-494.
  - [15] Alouini M S and Goldsmith A J. Adaptive modulation over Nakagami fading channels[J]. *Wireless Personal Communications*, 2000, 13(1/2): 119-143.
- 于晓丹: 女, 1988年生, 硕士生, 研究方向为多天系统链路的自适应技术。
- 陈小敏: 女, 1975年生, 博士, 副教授, 主要从事无线通信、空时编码的信号检测和链路自适应技术方向研究。
- 谭伟: 男, 1988年生, 硕士生, 研究方向为多天系统链路的自适应技术。