

基于最小误码率准则的快速自适应波束成型算法*

谢宁^{1,2}, 王晖¹, 陈金峰³, 周渊平⁴

1. 深圳大学信息工程学院, 广东深圳 518060;
2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096;
3. 中山大学电子与通信工程系, 广东广州 510275;
4. 四川大学电子信息工程学院, 四川成都 610064

摘要: 基于最小误码率(MBER)准则的自适应算法, 其具有远远优越于传统的最小均方误差(MMSE)准则的性能, 但其高复杂度限制了其在实际中的应用。在基于MBER准则的基础上, 提出了一种快速自适应波束成型算法, 在保证低复杂性的同时, 快速收敛于最优MBER解。更重要的是, 相对与传统MBER算法, 新提出的算法能得到更加优越的波束图, 使其更适用于时分双工(TDD)通信系统。

关键词: 最小误码率; 自适应波束成型; 快速收敛; 低复杂性

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)01-0043-05

Fast Adaptive Beamforming Algorithm Based on Minimum Bit Error Rate Criterion

XIE Ning^{1,2}, WANG hui¹, CHEN Jinfeng³, ZHOU Yuanping⁴

1. College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3. Department of Electronic & Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
4. School of Electronics & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The performance of an adaptive algorithm based on minimum BER (MBER) was superior to the one based the conventional minimum mean square error (MMSE), but the complexity is the limit on its application. A fast adaptive beamforming algorithms was proposed based on MBER, it had a low complexity and fast converge to the optimal MBER solution. More important, the proposed beamforming algorithm can obtain a better beampattern compared by the conventional MBER, which is very fit to the TDD communications system.

Key words: MBER; adaptive beamforming; fast convergence rate; low complexity

自适应算法被广泛的应用于各种通信系统, 如天线阵列和均衡器等等, 而传统的自适应算法大部分都是基于维纳方法或是最小均方误差(MMSE)准则^[1-3]。但是对于实际的通信系统, 往往最关心的是其误码率(BER)性能, 而不是其均方误差

(MSE)性能。理想上, 通信系统的设计应该直接基于最小化误码率(MBER), 才会达到更加优越的性能。已经有很多文献证明了基于MBER准则能提供优越于MMSE的性能, 如最近文献[4-8]中提出一种在无线通信中基于MBER准则的自适

* 收稿日期: 2009-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672020、60773203); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(W200815); 深圳大学科研启动基金资助项目(200861)

作者简介: 谢宁(1979年生), 男, 讲师, 博士; E-mail: kensouren@yahoo.com.cn

应天线阵列算法。该算法的核心主要采用典型 Parzen 窗密度函数估算方法来估算整个系统的误码率^[9-10], 然后在此基础上提出有效的实现方案。文献 [4-5] 提出了两种基于 MBER 准则的自适应算法, 分别是基于块 (block) 运算的 BMBER 算法和基于位运算的 LBER 算法。BMBER 算法收敛速度快, 最终收敛的误码率低, 但是其有复杂度高, 占用系统资源多和性能不稳定的缺陷。而 LBER 算法简单, 稳定, 但收敛速度慢以及最终收敛的误码率高。此外, 更重要的是, MBER 和 LBER 算法产生的波束图不够理想, 也就是波束的零点不能准确的对准干扰。虽然文 [4-5] 已经论证过波束图的好坏和最终的误码率的性能无直接的关系, 但是如果在上行链路接收时估算的权值能产生一个很好的波束图, 就能直接把接收权值应用于下行链路的发射波束, 如时分双工 (TDD) 通信系统, 这在一定程度上可以降低整个系统的复杂度。

在文献 [11] 中, 曾提出一种基于 MMSE 准则的波束合成技术, 本文在此基础上, 结合 LBER 算法, 提出一种基于最小误码率准则的快速自适应波束成型算法 (FBER)。本文提出的算法具有较低的计算复杂度和快速的收敛速度, 其最终收敛的权值接近最优 MBER 的解。同时能产生一个很好的波束图, 可以直接用于发射波束, 使整个算法非常适用于 TDD 通信系统。

1 信号模型

本文考虑由移动用户发射到基站的反向链路, 基站装配有 M 个间隔半波长的天线阵列。基站同时收到 I 个 DS-CDMA 信号, 其扩频增益为 L 。第 i 个信号所发射的信号为

$$u_i(t) = b_i(t) \sqrt{E_i} g_i(t) + d_i(t) \quad (1)$$

其中, $b_i(t) \in \{-1, 1\}$ 是指 t 时刻发射的信息位, E_i 为信号能量, $d_i(t)$ 是参考信号或导频信号, $g_i(t)$ 是归一化的用户信号波形。其模型为

$$g_i(t) = \sum_{l=0}^{L-1} w_i[l] p_i[l] \psi(t - lT_c) \quad (2)$$

其中 $w_i[l]$ 是第 i 个用户的扩频序列 walsh 码的第 l 位, $p_i[l]$ 是伪随机码, $\psi(t)$ 为码片波形, T_c 是码片周期。

通过多径衰落信道的传输, 基站均匀线性天线阵列接收到的信号为

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^I \sqrt{E_i} h_i u_i(t) \mathbf{v}(\theta_i) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

其中 $\sqrt{E_i}$, h_i 是第 i 个人射信号的发射功率和信

道响应, $\mathbf{n}(t)$ 是加性高斯白噪声。 $\mathbf{v}(\theta_i)$ 是第 i 个人射信号的天线阵列响应向量, 其中 θ_i 为第 i 个人射信号的入射方向角。假设第 1 个信号是期望信号, 其他的为干扰信号。对入射信号 $\mathbf{x}(t)$ 按码片速率采样得到 $\mathbf{x}(k)$, 则自适应天线阵列的输出为

$$y(k) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(k) \quad (4)$$

其中 \mathbf{w} 是自适应天线阵列的接收权向量, 维数为 M 。

2 最小误码率准则

文献 [9-10] 提供了一种, 通过 Parzen 窗函数估计方法来估算得到天线阵列输出的概率密度函数的核密度估计。在此基础上可以得到整个系统的估算 BER

$$\hat{P}_E(\mathbf{w}) = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N Q(\hat{g}(\mathbf{w})) \quad (5)$$

其中 N 是训练样本个数,

$$Q(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^{\infty} e^{-\frac{v^2}{2}} dv \quad (6)$$

$$\hat{g}(\mathbf{w}) = \frac{\text{sgn}(b_1(k)) y_R(k)}{\rho_n \sqrt{\mathbf{w}^H \mathbf{w}}} \quad (7)$$

其中 ρ_n 是核宽度, $y_R(k) = R[\mathbf{w}^H \mathbf{x}(k)]$ ($R[\cdot]$ 表示取实部运算) 是输出信号的实部, 而 $b_1(k)$ 可以认为是期望用户的参考信号。通过求公式 (5) 的梯度并进行如下迭代可以得到 BMBER 的解^[4-5]:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu \mathbf{d}(k)$$

$$\mathbf{w}(k+1) = \frac{\mathbf{w}(k+1)}{\|\mathbf{w}(k+1)\|}$$

$$\varphi_k = \frac{\|\nabla P_E(\mathbf{w}(k+1))\|^2}{\|\nabla P_E(\mathbf{w}(k))\|^2}$$

$$\mathbf{d}(k+1) = \varphi_k \mathbf{d}(k) - \nabla P_E(\mathbf{w}(k+1))$$

其中 $\mu > 0$ 是迭代步长, $\mathbf{d}(k)$ 是方向向量指向公式 (5) 的梯度方向, 可设 $\mathbf{d}(0) = 0$ 。同时设置一个阈值 $\beta > 0$, 当 $\|\nabla P_E(\mathbf{w}(k))\| < \beta$ 时, 停止迭代运算。由式 (5) 可以看出, BMBER 算法每一次的迭代需要保存前 $N-1$ 个时刻的信息, 这样不仅增加了整个系统的存储要求, 也使其的性能在快速变化信道有所衰退。另外更重要的是, 在文献 [4-5] 中已经提到, BMBER 算法的迭代过程存在不稳定性。搜索的方向向量 $\mathbf{d}(k)$ 每次指向的不一定是对准最优值的方向, 有可能指向反方向, 这个时候就需要周期性的对 $\mathbf{d}(k)$ 的指向进行反向复位操作。

当将 BMBER 算法中, 将训练样本个数退化成一个信息位 ($N=1$) 的时候, 就可以得到文献 [4

-5] 提出的 LBER 算法:

$$w(k+1) = w(k) + \mu \frac{\text{sgn}(b_1(k))}{2\sqrt{2\pi\rho_n}} e^{(-\frac{\gamma_k^2(k)}{2\rho_n^2})} x(k) \quad (8)$$

LBER 算法虽然比 BMBER 算法稳定而且计算复杂度低, 但是收敛速度慢, 最终的收敛效果也不理想。

3 基于最小误码率准则的快速自适应算法

在文献 [11] 中提出了一种基于 MMSE 准则的波束合成算法, 其代价函数定义为

$$\min_w \sum_{n=1}^N f(\theta_n) |v(\theta_n)^H w - P_r(\theta_n)|^2, \text{ s. t. } Cw = c$$

其中, $f(\theta_n)$, $v(\theta_n)$, $P_r(\theta_n)$ 分别是在波达角 θ_n 方向上权重方程, 阵列响应向量和参考波束响应。 C 是约束矩阵, 它的每一行都能固定天线阵在某一个特定的人射角上的响应到一个预设值, c 是条件向量。对应的接受权值向量 w 可以通过迭代的算法得到^[12]:

$$w(k+1) = w_c + P \{ w(k) - \mu \sum_{n=1}^N f_k(\theta_n) \quad (9)$$

$$[v(\theta_n)^H w(k) - P_r(\theta_n)] v(\theta_n) \}$$

其中, μ 是迭代步长, $w_c = C^H(CC^H)^{-1}c$, $P = I - C^H(CC^H)^{-1}C$ 。为了降低复杂度, 如果只需要控制零点, 即让天线阵列在干扰方向 $\theta_i (i = 2, L, I)$ 上的响应逼近于零, 也就是设置 $P_r(\theta_k) = 0$, 这时无需约束条件, $C = \mathbf{0}$, $w_c = \mathbf{0}$ 和 $P = I$ 。式 (9) 可以简化为

$$w(k+1) = w(k) - \mu Hw(k) \quad (10)$$

其中 $H = \sum_i \{v(\theta_i)h_i\} \{v(\theta_i)h_i\}^H (i = 2, L, I)$ 定义为干扰矩阵。

结合式 (8) 和式 (10), 可以得到一种基于最小误码率准则的快速自适应波束成型算法。算法迭代方程如下:

$$w(k+1) = w(k) + \mu_1 \frac{\text{sgn}(b_1(k))}{2\sqrt{2\pi\rho_n}} e^{(-\frac{\gamma_k^2(k)}{2\rho_n^2})} x(k) - \mu_2 Hw(k) \quad (11)$$

其中 μ_1 和 μ_2 是迭代步长。式 (11) 中右边第 3 项在权值的迭代过程中主要起到抑制干扰的作用, 使接收权值收敛到更加趋近于最优 MBER 的性能, 而计算复杂度却远远小于 BMBER 算法。同时其也加速了整个迭代过程的收敛速度和改善接收权值的波束图性能。后面的仿真结果也将证明上述结论。

但是, 不幸的是, 在实际通信系统中, 很难直接得到干扰矩阵 H , 所以本文根据一种估算干扰矩阵 H 的方法^[13], 得到基于最小误码率准则的快速自适应波束成型算法 (FBER), 如下

$$\tilde{p}(k) = \frac{1}{k} [(k-1)\tilde{p}(k-1) + b_1(k)x(k)] \quad (12)$$

$$\tilde{h}(k) = r(k) - b_1(k)\tilde{p}(k) \quad (13)$$

$$\tilde{H}(k) = \frac{1}{k} [(k-1)\tilde{H}(k-1) + \tilde{h}(k)\tilde{h}(k)^H] \quad (14)$$

$$w(k+1) = w(k) + \mu_1 \frac{\text{sgn}(b_1(k))}{2\sqrt{2\pi\rho_n}} e^{(-\frac{\gamma_k^2(k)}{2\rho_n^2})} x(k) - \mu_2 \tilde{H}(k)w(k) \quad (15)$$

其中 $\tilde{p}(0) = 0$, $\tilde{H}_1(0) = \delta I$, $\delta > 0$ 是一个小实数。

4 系统复杂性分析与比较

通过比较上 LMS、LBER、BMBER 和 FBER 算法更新一次权值所需要的计算量和对系统存储量的要求, 来比较各种算法的复杂性。比较的结果如表 1 所示。

表 1 系统复杂性比较

Table 1 Comparison of Complexity

算法	乘法器	指数运算 $e^{(\cdot)}$	系统存储的信息位个数
LMS	$2M+2$	无	1
LBER	$2M+4$	1	1
BMBER	$3MN+8M+5N+2$	N	N
FBER	$2M^2+6M+5$	1	1

其中 M 表示天线阵元数, N 表示 BMBER 算法更新权值的时候系统需要存储的信息位个数。这里需要说明的是, 在实际通信系统中 $N \geq M$, 如果 N 变的很小时, BMBER 算法将逐渐退化成 LBER 算法。从表 1 可以清楚的看到, 传统 LMS 算法的系统复杂性最低, 而 LBER 算法次之。本文提出的 FBER 算法在指数运输和系统存储的信息位个数方面的复杂性和 LBER 算法是一样的, 在乘法器方面略高于 LBER 算法。而 BMBER 算法则在整个系统复杂性方面远远高于其他三种算法。比如当 $M=4$, $N=32$, 各算法调用乘法器的个数分别为: LMS (10)、LBER (12)、BMBER (706)、FBER (61)。

5 仿真结果

对前面的理论分析结果, 可以通过计算机仿真实验的方法进行检验。天线阵列采用线性均匀阵列, 天线阵列元素 $M=4$, 每个元素之间间隔为半波长。扩频采用 Walsh 序列, 扩频增益 $L=16$ 。扰码是由 15 级移位寄存器所产生的 m 序列信号。每一路入射信号都通过独立的 Rayleigh 衰落信道, 并且每一路信号到达天线阵列的入射角度是在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 中分布。噪声采用加性高斯白噪声。本文提到的各种自适应算法中的迭代步长根据实验经验选取最小收敛误差的值。实验结果通过 1 000 次独立实验平均后得到。在第一个例子首先比较各种自适应算法的收敛速度, 假设总共有 6 个人射信号 ($I=6$), 期望信号的入射角度为 $\theta_1 = 0^\circ$, 其他的干扰信号的入射角度为, $\theta_2 = 30^\circ$, $\theta_3 = 55^\circ$, $\theta_4 = -25^\circ$, $\theta_5 = -50^\circ$, $\theta_6 = -65^\circ$ 。期望信号和其他干扰信号功率相同, 而高斯加性白噪声功率为 -5 dB, Rayleigh 信道的多普勒频移为 20 Hz。将 LMS、LBER、BMBER ($N=50$)、FBER 和 FBER_{opt} 算法的收敛性能进行比较, 这里的 FBER_{opt} 是指在迭代过程中, 干扰矩阵 \mathbf{H} 不是通过估算得到的, 而是直接给定的, 实验结果如图 1 所示。

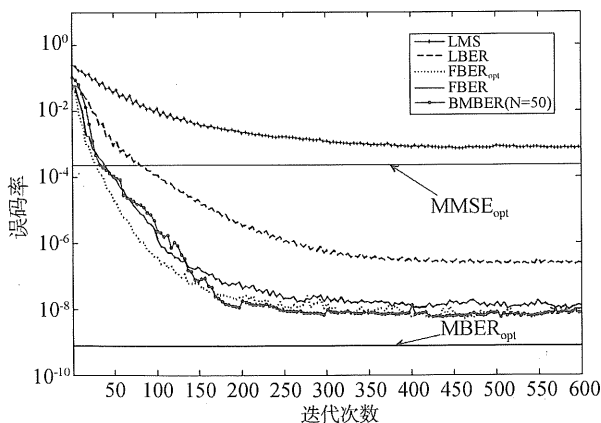


图 1 自适应算法的收敛性能

Fig. 1 Convergence performance of adaptive algorithms

图 1 同时给出了最优 MMSE_{opt} 和最优 MBER_{opt} 的解作为参考。如图 1 所示, 最优 MMSE_{opt} 和最优 MBER_{opt} 之间的性能差别是非常明显的。LMS 算法虽然复杂性低, 但也是性能最差的一个, 只能缓慢的趋近于最优 MMSE_{opt} 的性能。LBER 算法性能有明显的提升, 但其收敛速度和最终的收敛性能还是不够理想。本文提出的 FBER_{opt} 和 FBER 算法性能

明显的提升收敛速度和优化最终的收敛误差, 其中 FBER 算法由于要估算干扰矩阵 \mathbf{H} , 所以其性能略差于 FBER_{opt} 算法。而 BMBER 算法由于其非线性, 迭代过程需要周期性对梯度方向进行复位^[4-5], 导致其迭代过程的产生很大的抖动, 减慢了其收敛速度。值得一提的是, BMBER 算法中的系统存储信息为个数 N 越小就越趋近于 LBER 算法, 而需要把 N 大于等于 50 才有接近本文所提出的算法, 但如表 1 所示, 这时 BMBER 算法的复杂性是远远大于 FBER 算法的。

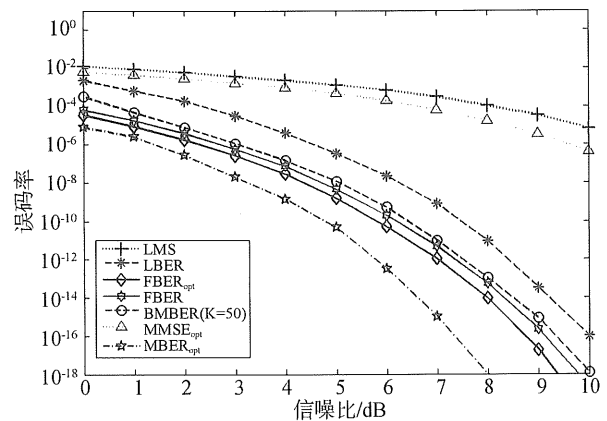


图 2 自适应算法的误码率性能

Fig. 2 BER performance of adaptive algorithms

接下来将研究这些自适应算法在快速衰落信道下的性能。实验结果如图 2 所示, 其中 Rayleigh 信道的多普勒频移设为 120 Hz, 研究 SNR 从 0 dB 到 10 dB 时各种自适应算法的误码率性能, 其他仿真条件和前一个实验例子一致。从图 2 可以看出, 在快速衰落信道下, FBER_{opt} 和 FBER 算法仍然保持着优越的性能, 而 BMBER 算法的性能则略微有所衰退。

最后将研究各种自适应算法估算出来的接收滤波权值所产生的波束图, 研究其是否能直接应用于发射波束。设天线阵列元素 $M=8$, 期望信号的入射角度为 $\theta_1 = 0^\circ$, 其他的干扰信号的入射角度为, $\theta_2 = -45^\circ$, $\theta_3 = -30^\circ$, $\theta_4 = 50^\circ$ 。期望信号和其他干扰信号功率相同, 而高斯加性白噪声功率为 -5 dB Rayleigh 信道的多普勒频移为 20 Hz。结果如图 3 所示, FBER_{opt} 和 FBER 算法都能产生很好的波束图, 其零点能准确的对准干扰信号。而 LBER 和 BMBER ($N=50$) 算法却得不到一个好的波束图。在 TDD 通信系统中, FBER_{opt} 和 FBER 算法所产生的波束图是直接能用于发射波束的, 而 LBER 和 BMBER ($N=50$) 算法却不行。

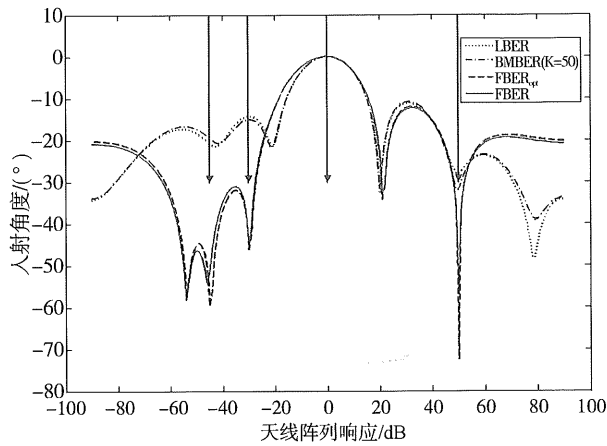


图 3 天线阵列波束图

Fig. 3 Beam pattern of antenna array

6 结 论

本文在一个改进的波束合成算法和 LBER 算法基础上, 提出了基于最小误码率准则的快速自适应波束成型算法 (FBER), 相对于 BMBER 算法具有较低的计算复杂度和快速的收敛速度, 其迭代过程更加稳定, 而且其最终收敛的权值更加接近最优 MBER 的解。同时 FBER 算法能产生一个很好的波束图, 可以直接用于发射波束, 例如 TDD 通信系统。本文提出的方法也使得 MBER 准则更加适用于实际通信系统。

参考文献:

- [1] ZHIYONG H, BALANIS C A. The MMSE algorithm and mutual coupling for adaptive arrays, Antennas and propagation[J]. IEEE Transactions on, 2008, 56:1292 - 1296.
- [2] HUI C, CHOW C S. Blind linear MMSE receivers for MC-CDMA systems[J]. Circuits and Systems I: Regular Papers. IEEE Transactions on, 2007, 54:367 - 376.
- [3] HENDRIKS R C, HEUSDENS R, JENSEN J. An MMSE estimator for speech enhancement under a combined stochastic-deterministic speech model[J]. Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on, 2007, 15:406 - 415.
- [4] CHEN S. Nonlinear and non-gaussian signal processing: adaptive minimum bit-error-rate filtering[J]. IEE Proc. On Vision Image Signal Processing, 2004, 151(1):76 - 85.
- [5] CHEN S, AHMAD N N, HANZO L. Adaptive minimum bit-error rate beamforming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(2):341 - 348.
- [6] SHENG C, LIE-LIANG Y. Downlink MBER beamforming transmitter based on uplink MBER beamforming receiver for TDD-SDMA MIMO systems [C]. Statistical Signal Processing, IEEE/SP 15th Workshop on, 2009: 433 - 436.
- [7] SUGIURA S, SHENG C, HANZO L. Reduced-complexity iterative markov chain MBER detection for MIMO systems[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2009, 16: 160 - 163.
- [8] SHUANG T, SHENG C, HANZO L. On multi-user EXIT chart analysis aided turbo-detected MBER beamformer designs[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2008, 7: 314 - 323.
- [9] PARZEN E. On estimation of a probability density function and mode[J]. Ann. Math. Stat., 1962, 33:1066 - 1076.
- [10] SILVERMAN B W. Density estimation [M]. U. K.: Chapman Hall, 1996.
- [11] NING X, YUANPING Z, MINGHUA X, WENMING T. Fast blind adaptive beamforming algorithm with interference suppression [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2008, 57:1985 - 1988.
- [12] JOHNSON D H, DUDGEON D E. Array signal processing concepts and techniques [M]. NJ: Prentice Hall, 1993.
- [13] PSAROMILIGKOS I N, BATALAMS S N. Recursive short-data-record estimation of AV and MMSE/MVDR linear filter for DS-CDMA antenna array systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(1): 136 - 148.