

# 基于改进的自相关匹配准则的盲均衡算法

蓝 宏<sup>1</sup>, 宋 梁<sup>1</sup>, 胡 波<sup>1</sup>, 凌 燮 亭<sup>1</sup>, Ruey2wen Liu<sup>2</sup>

(11 复旦大学电子工程系, 上海 200433; 21 University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, USA)

摘 要: 本文针对多输入多输出(MIMO)信道模型, 提出了一种新的信道盲均衡算法. 该算法根据迫零条件, 通过具有特殊自相关函数的前置滤波器的设计, 采用改进的自相关匹配准则, 实现了信道的完全均衡和信号的恢复. 文章从理论上证明了该算法在存在高斯白噪声(AWGN)的非理想信道中, 能够在信噪比变化的情况下满足迫零条件. 通过与原有的自相关匹配方法、最小均方算法(LMS)的比较, 模拟结果显示了本方法良好的性能.

关键词: 自相关匹配; 盲均衡; 多输入多输出信道模型

中图分类号: TN713 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2003)07-1092-03

## Blind Equalization Based on the Modified Principle of Autocorrelation Matching

LAN Hong<sup>1</sup>, SONG Liang<sup>1</sup>, Hu Bo<sup>1</sup>, LING Xie2ting<sup>1</sup>, Ruey2wen Liu<sup>2</sup>

(11 Electronic Engineering Department, Fudan University, Shanghai, 200433, China;

21 University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, USA)

Abstract: In this paper, a new blind equalization method based on the modified principle of Autocorrelation Matching for Multi-Input Multi-Output (MIMO) Channel is presented. Theoretically, it can consistently enforce the zero-forcing condition in AWGN channel when SNR varies. Simulation results shows that compared with AM and LMS method, it is multiple access interference (MAI) resistant, and intersymbol interference (ISI) resistant.

Key words: autocorrelation matching; blind equalization; MIMO channel

### 1 引言

随着第三代移动通信系统的逐步开通, 室内环境下的信息最高传输率可达 2Mb/s. 但是, 由于符号速率的增加, 扩频系数的降低, 信号必然受到相邻符号的干扰 (ISI); 同时, 由于第三代移动通信是以 CDMA 为基础的, 非理想的扩频序列会导致多址干扰的存在 (MAI). 因此, 在接收端, 必须考虑同时消除 ISI 和 MAI, 即实现信道的均衡与信号的分离.

一个典型的系统如图 1 所示, 其中,  $\{h_i(z)\}$  表示信道,  $\{s_i(t)\}$  表示进入信道的信号,  $n(t)$  为加性高斯白噪声,  $x(t)$  为接收信号,  $w(z)$  则为接收端用于分离和均衡的滤波器.  $\hat{s}_i(t)$  表示对信号  $s_i(t)$  的估计.

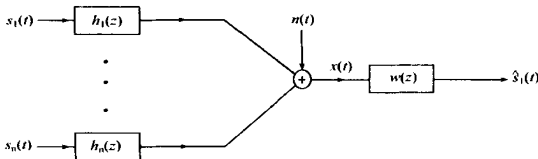


图 1 信道均衡和信号分离框图

滤波器  $w(z)$  的目的是消除多址干扰以及信道本身非理想引起的码间干扰. 因此, 在频域中,  $w(z)$  应满足迫零条件<sup>[1]</sup>:

$$w^T(z)H(z) = (A z^{-1} \ 0 \ \dots \ 0), |A| = 1, 1 \setminus 0 \quad (1)$$

当迫零条件得到满足时,  $w(z)$  就完成了对信道的均衡, 并且抑制了其它的信号对有用信号的干扰. 噪声引起的干扰则留给下一环节的编码/解码技术来解决.

传统的均衡/分离技术中, 无论是否使用训练码, 均存在迫零条件只有在无噪声情况下才能满足以及只存在近似的 FIR (有限冲激响应)迫零均衡器等不足<sup>[1]</sup>.

L. Tong 等提出了一种盲分离和均衡算法<sup>[2,5]</sup>, 部分地解决了这个问题, 但是该方法只能应用于 1 个用户的系统中. 1994 年 Coman 提出并证明了信号的可分离条件. 此后又有人在此基础上提出了一些适用性更广的盲分离算法<sup>[9,10]</sup>. A. Gorokhov 等提出了子空间分解的方法同时完成分离和均衡<sup>[3]</sup>, 可以应用于多于 2 个用户的系统, 但是该方法对信道阶数的估计非常敏感.

2001 年 H. Luo 和 R. Liu 提出的自相关匹配的方法<sup>[4]</sup>, 根

据信号的不相关性,利用信号的二阶统计量完成了对信道的均衡和信号的分离.该方法可适用于多输入多输出(MIMO)系统.但是,该方法的良好性能不能推广到有噪声的情况.

在本文中,我们提出了一种改进的自相关匹配的方法,根据该方法可以实现在 AWGN 信道信噪比变化的情况下也能满足迫零条件的 FIR 滤波器.

### 2 系统结构和自相关匹配原理

考虑无线通信系统中一个 N 用户的问题.如图 2 所示的系统有 n 个发送端, m 个接收端,构成一个 MIMO 系统.  $w(z)$  为接收端的滤波器.其中,  $H(z)$  中的分量  $h_{ij}(z)$  表示从第 i 个发送端到第 j 个接收端的信道.  $G(z)$  表示整个系统的传输函数,  $G(z) = H(z)w(z)$ , 其分量

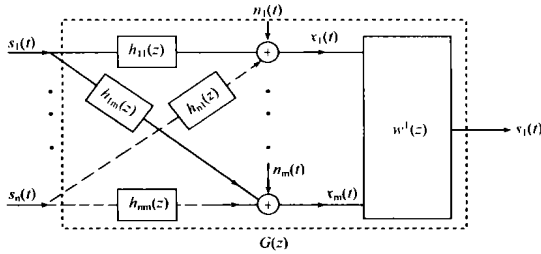


图 2 N2用户多天线系统

$$g_i(z) = \sum_{j=1}^n h_{ij}(z) w_j(z) \quad (2)$$

在无噪声情况下,系统描述为

$$y(t) = g^T(z) s(t) = g_1(z) s_1(t) + g_2(z) s_2(t) + \dots + g_n(z) s_n(t) \quad (3)$$

其中

$$g_i(z) = a_{i0} + a_{i1}z^{-1} + \dots + a_{iL_G}z^{-L_G}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

针对上述系统, H. Luo<sup>[4]</sup>提出了自相关匹配的方法.

**自相关匹配原理** 若信号的自相关函数及其线性移位后得到的函数组成的集合  $\{r_i(S+k), i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, L_G\}$  中的各个函数线性不相关(该条件称为移位独立条件), 则当噪声  $n(t) = 0$  时, 迫零条件式(1)得到满足的充要条件是  $s_1(t)$  的自相关函数和  $s_i(t)$  的自相关函数匹配, 即

$$r_{s_1}(S) = r_{s_i}(S) \quad (5)$$

详细的推导证明见文献[4]. 注意, 迫零条件式(1)意味着满足该条件的整个系统可以消除信号间干扰和码间干扰的影响. 因为方程式(5)只取决于二阶统计量, 该方法对于异步的信号也适用. 另外, 它也不需要训练序列. 它的抗信道间干扰性已经应用于无线局域网<sup>[8]</sup>.

### 3 改进的自相关匹配原理

在没有噪声存在的情况下, 自相关匹配滤波器能够很好地完成信道均衡和信号分离. 但是在推广到有噪声存在的情况时, 噪声的存在破坏了原来满足的关系, 使得系统不再满足迫零条件.

在白噪声的情况下, 对  $m_2$  输入,  $m_2$  输出系统的描述变成

了, 即

$$y(t) = w^T(z) x(t) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{即 } y(t) &= w^T(z) H(z) s(t) + w^T(z) n(t) \\ &= g^T(z) s(t) + w^T(z) n(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{要求 } r_y(S) = r_{s_1}(S) \quad (8)$$

而

$$\begin{aligned} r_y(S) &= \sum_{k=-L_G}^{L_G} A_{1k} r_{s_1}(S+k) + \sum_{k=-L_G}^{L_G} A_{2k} r_{s_2}(S+k) + \dots \\ &\quad + \sum_{k=-L_G}^{L_G} A_{nk} r_{s_n}(S+k) + p(S) R^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } A_k &= \sum_{j=0}^{L_G-k} a_{ij} a_{i, j+k}; p(0) = w_0 w_0^+ + w_1 w_1^+ + \dots + w_{L_w} w_{L_w}^+; \\ p(L_w) &= w_0 w_1^+ + w_1 w_2^+ + \dots + w_{L_w-1} w_{L_w}^+ \end{aligned}$$

s

$$p(L_w) = w_0 w_{L_w}^+$$

以及

$$p(S) = 0, |S| \leq L_w \quad (10)$$

这里仍然假设各信号不相关的, 信号和噪声也是不相关的.

由此可见, 白噪声的存在破坏了系统对迫零条件的满足.

为此, 我们对自相关匹配原理进行了改进, 使得在白噪声的情况下, 仍然能够得到相应的  $w(z)$ , 而使系统满足迫零条件, 完成对信道的均衡和信道的分离.

白噪声通过接收端的滤波器  $w(z)$  后, 其自相关函数仍然是截尾的, 即在式(10)中, 有

$$p(S) = 0, |S| \leq L_w$$

那么, 在自相关匹配中, 选择  $|S| \leq L_w$  的项进行匹配, 仍能得到满足迫零条件的解. 即将匹配条件改为

$$r_y(S) = r_{s_1}(S), |S| \leq L_w \quad (11)$$

当该条件满足时, 仍有

$$g^T(z) = w^T(z) H(z) = (\mathcal{A}^{-1} \ 0 \ \dots \ 0) \quad (12)$$

由此得到了改进的自相关匹配原理: 设信号的自相关函数及其线性移位后得到的函数组成的集合  $\{r_i(S+k), i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, L_G\}$  中的各个函数线性不相关, 且  $\{r_i(S)\}$  为拖尾的或具有  $S_0 \sim K$  步截尾性质. 则迫零条件式(1)得到满足的充要条件是  $s_1(t)$  的自相关函数与  $s_i(t)$  的自相关函数相匹配, 即

$$r_{s_1}(S) = r_{s_i}(S), \text{对任意的 } |S| \leq L_w \quad (13)$$

这样, 在 AWGN 信道中, 当信噪比变化时, 都可以用改进的自相关匹配的方法来满足迫零条件.

值得注意的是, 与原来的方法相比, 改进的自相关匹配的方法对信号的要求也是不同的. 相应于发送信号是由具有白噪声特征的信号通过预滤波器后得到的情况, 使用改进的自相关匹配的方法, 预滤波器的阶数要增加  $L_w$ .

实际上, 如果欲发送的信号具有白噪声的自相关特征, 可以使用在该信号上叠加一个有色序列的方法代替预滤波器的作用. 即

$$s_1(t) = s_1(t) + s_0(t) \quad (14)$$

以及

$$r_1(S) = r_1(S) + r_0(S) \quad (15)$$

其中  $s_0(t)$  是已知的、与发送信号不相关的有色序列, 其自相关函数是  $K$  步截尾的, 其中

$$K \setminus \frac{(N-1)(2L_G+1)}{2} + L_w \quad (16)$$

在接收端完成对信道的均衡和信号的分离后, 将已知的有色序列从接收信号中减去即可。

### 4 模拟结果

如图 2, 我们对一个 2 用户、4 接收器、1 个输出端的系统进行了模拟。系统中, 信道的阶数设定为 2, 滤波器的阶数设定为 1. 并对信号  $s_1(t)$  和  $s_2(t)$  进行了设计使之满足移位独立条件。

该模拟的目的是证明在 AWGN 信道中, 在信噪比变化的情况下, 迫零条件式 (1) 可以由改进自相关匹配式 (13) 来满足。图 3 显示了信噪比变化时整个系统传输函数的峰值平方失真度, 其定义为

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{L_G-1} a_{ij}^2 - a_{1,0}^2}{a_{1,0}^2} \quad (17)$$

其中  $a_{ij}$  为加上均衡器后整个系统传输函数的参数。D 反映了码间干扰的程度, D 越小, 则残存的码间干扰越小。由图中可以看出, 与自相关匹配的方法相比, 改进自相关匹配的方法对应的峰值平方失真度 D 较小, 且在信噪比变化时没有明显的变化, 即噪声的增大没有引起系统性能的明显恶化。

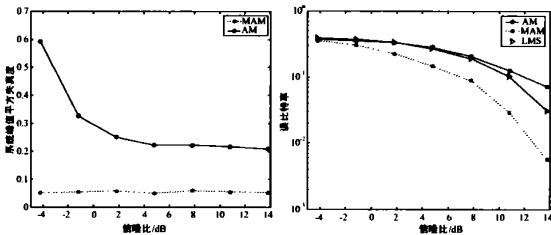


图 3 系统峰值平方失真度 vs. 信噪比

图 4 误码率 vs. 信噪比

图 4 显示了应用改进的自相关匹配方法、自相关匹配方法和 LMS 方法(采用训练序列, 并且同样采用天线阵技术)的系统在信噪比变化时传输误码率的变化。由图中可见, 改进的自相关匹配的方法在获得低误码率方面要优于另外两种方法。

### 5 结论

本文给出了基于改进的自相关匹配原理的滤波器, 并从理论上证明了该滤波器能够在信噪比变化的 AWGN 信道中满足迫零条件。还对该方法和原自相关匹配的方法、LMS 的方法进行了比较, 模拟结果显示改进自相关匹配的方法在获

得低误码率的方面要优于上述另外两种方法。

### 参考文献:

- [ 1 ] J G Proakis. Digital Communication [M]. 北京: 电子工业出版社, 1998. 636- 674.
- [ 2 ] L Tong, G Xu, T Kailath. A new approach to blind identification and equalization of multipath channels [A]. Proc. 25th Asilomar Conf., Pacific Grove [C]. CA, USA: ACPG, 1991. 856- 860.
- [ 3 ] A Gorokhov, P Loubaton. Subspace based techniques for blind separation of convolutive mixtures with temporally correlated source [J]. IEEE Trans, 1997, Circuits Syst. 244(9): 813- 820.
- [ 4 ] Hui Luo, Ruy Wen Liu, Xieting Lin, Xin Li. The Autocorrelation Matching Method for Distributed MIMO Communications over Unknown FIR Channels [A]. Proc. of ICASSP [C], Salt Lake City, UT, USA: ICASSP, 2001.
- [ 5 ] L Tong, G Xu, T Kailath. Blind identification and equalization based on second order statistics: A time domain approach [J]. IEEE Trans, 1994, Inform. Theory 40(3): 340- 349.
- [ 6 ] G J Foschini. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas [R]. USA: Bell Labs Technical Journal, 1996.
- [ 7 ] G J Foschini, M J Gans. On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas [J]. Wireless Personal Communication, 1998, (6): 311- 335.
- [ 8 ] Hui Luo, Ruy Wen Liu. Apply autocorrelation matching method to outdoor wireless LAN on channel interference suppression and channel equalization [A]. WCNC2002 [C]. Orlando, USA: WCNC, 2002.
- [ 9 ] XR Cao, R W Liu. General approach to blind source separation [J]. IEEE Trans, 1996, Signal Processing 244(3): 562- 571.
- [ 10 ] 张洪渊, 史习智. 一种任意信号源盲分离的高效算法 [J]. 电子学报 2001, 29(10): 1392- 1396.

### 作者简介:



蓝 宏 女, 1978 年 5 月生于上海市, 2000 年于浙江大学信息与电子工程系获学士学位, 现为复旦大学电子工程系硕士二年级, 研究方向为无线通信技术, 通信中的信号处理等。



宋 梁 男, 1980 年 5 月生于上海市, 1999 年与上海交通大学电子工程系获学士学位, 现为复旦大学电子工程系硕士三年级, 研究方向包括通信原理, 无线通信技术, 盲信号处理等。