

文章编号 :1000-582X(2007)10-0046-04

空间频率分集 MIMO-OFDM 系统的分步半定松弛检测

杨斌, 龚萍, 李永华, 吴伟陵

(北京邮电大学 信息工程学院, 北京 100876)

摘要 :分析了空间频率分集 MIMO-OFDM 系统的 DFE-SDR 译码算法。提出了一种能充分利用空间分集、空间复用、频率复用增益,且能对抗时间选择性和频率选择性衰落的空时频率分集 MIMO-OFDM 系统,结合判决反馈均衡(DFE)以及半定松弛检测(SDR)的优点,经过推导得到一种应用在空时频率分集 MIMO-OFDM 系统的 DFE-SDR 检测方法,该算法能同时得到较理想的系统性能和算法复杂度。系统仿真证明,该方法与 DFE 检测算法相比,误码率性能得到了较大提高,可以适用于更广泛的通信环境。

关键词 :空间频率分集;MIMO-OFDM;DFE-SDR;译码算法

中图分类号 :TN911.23

文献标志码 :A

为了充分利用空间分集、空间复用增益,在已采用 VBLAST 系统的多入多出(MIMO)系统中增加空间分集(SD),这个组合系统称为空间分集多入多出(SD-MIMO)系统,如果再结合频率分集,则称为空间频率分集多入多出(SFD-MIMO)系统。

同时,采用正交频分复用(OFDM)技术将频率选择性衰落信道分解成若干个子载波上的平坦衰落信道。这样,多天线技术可以应用到频率选择性衰落信道。将 OFDM 技术应用 MIMO 系统中,就形成了 SD-MIMO-OFDM 系统^[1]和 SFD-MIMO-OFDM 系统^[2]。

由于 ML 算法的搜索空间与星座点数目和发送天线个数呈指数增加,复杂度较高,因此很少实用。次优算法^[3]一般可以分为三类:线性检测(LD)^[4]、非线性检测(NLD)和准最大似然检测(QMLD)算法。其中线性检测算法的特点是复杂度最低,但是性能相对来说较差,很少用于实际的通信环境,包括半定松弛检测(SDR)^[5-6]算法在内的准最大似然检测的性能在 3 类次优算法中最高,但复杂度相对线性检测来说也有较大增加,非线性检测的一种典型算法是判决反馈均衡

(DFE)^[7]算法,它的特点是引入了干扰删除,在复杂度略微提高的同时保证了较好的性能。但是,DFE 算法由于没有进行最大似然搜索过程,性能仍然有提高的潜力。

笔者将针对 SFD-MIMO-OFDM 系统,在 MIMO-OFDM 已有检测算法的基础上,结合 DFE 和 SDR 检测思想,提出一种有效的检测算法,该算法结合了 SDR 算法性能较好及 DFE 复杂度较低的优点,能在等效收发天线数相等情况下将最低分集阶数从 1 提高到某常数,性能相比 DFE 检测要高出很多。

1 系统模型

图 1 表示了 SFD-MIMO-OFDM 系统的收发结构。设系统有 N_R 根接收天线和 N_T 根发射天线, $N_T = 2 N_R$; 另外子载波总数为 N 。

在发端,原始数据经过星座映射变成复数据,假定采用 QPSK 调制方式,调制后数据设为 s 。 s 经过串并变换送入 VBLAST 编码器,得到 L 个独立的数据流($L = N_T/2$)^[8],即 s_1, \dots, s_L 。每一层数据流 s_l ($l = 1, 2, \dots,$

收稿日期:2007-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90204001)

作者简介:杨斌(1977-),男,博士研究生,主要研究方向为 B3G 移动通信关键技术(E-mail:9660@vip.sina.com)。

L) 在两个子载波上应用 SFBC 编码, 得到两个 SFBC 数据子流 $s_i^{(1)}$ 和 $s_i^{(2)}$ 。

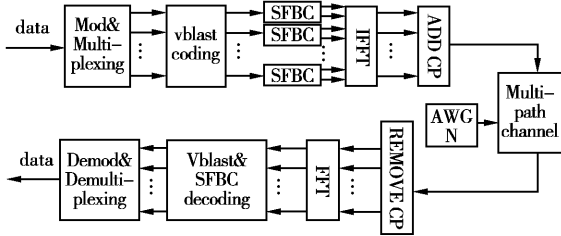


图 1 SFD-MIMO-OFDM 系统结构

所有 N_T 个 SFBC 数据子流经过 N 次 IFFT 变换并加入循环前缀 (CP) 消除码间干扰, 经过 N_T 根发射天线发送出去。

在收端, 每根接收天线上的信号首先经过 FFT 变换及去 CP, 得到频域的基带信号。因为 OFDM 已经将频选信道平坦化了, 因此, 在某一子载波对 $k(k = 1, 2, \dots, N/2)$ 上, 系统输入输出关系如下式所示:

$$r_k = H_k s_k + n_k \quad (1)$$

其中 r_k, s_k, H_k 分别表示该子载波对上的接收信号向量、发射信号向量以及信道响应矩阵。表达式分别如下

$$r_k = [r_{1\rho} \quad r_{1\varepsilon}^* \quad r_{2\rho} \quad r_{2\varepsilon}^* \quad \dots \quad r_{N_R\rho} \quad r_{N_R\varepsilon}^*]^T, \quad (2)$$

$$s_k = [s_{1\rho} \quad s_{1\varepsilon} \quad s_{2\rho} \quad s_{2\varepsilon} \quad \dots \quad s_{L\rho} \quad s_{L\varepsilon}]^T, \quad (3)$$

$$n_k = [n_{1\rho} \quad n_{1\varepsilon}^* \quad n_{2\rho} \quad n_{2\varepsilon}^* \quad \dots \quad n_{L\rho} \quad n_{L\varepsilon}^*]^T,$$

$$H_k = \begin{bmatrix} h_{11\rho}^{(1)} & h_{11\varepsilon}^{(2)} & \dots & \dots & h_{1L\rho}^{(1)} & h_{1L\varepsilon}^{(2)} \\ h_{11\varepsilon}^{(2)*} & -h_{11\rho}^{(1)*} & \dots & \dots & h_{1L\varepsilon}^{(2)*} & -h_{1L\rho}^{(1)*} \\ & & \ddots & & & \\ & & & \ddots & & \\ h_{N_R\rho}^{(1)} & h_{N_R\varepsilon}^{(2)} & \dots & \dots & h_{N_R\rho}^{(1)} & h_{N_R\varepsilon}^{(2)} \\ h_{N_R\varepsilon}^{(2)*} & -h_{N_R\rho}^{(1)*} & \dots & \dots & h_{N_R\varepsilon}^{(2)*} & -h_{N_R\rho}^{(1)*} \end{bmatrix}.$$

其中下标 ρ 表示第 $2k-1$ 个子载波上的相关量, 下标 ε 表示第 $2k$ 个子载波上的相关量。

上式已经考虑了加入 SFBC 编码后, 因为接收天线数小于发射天线数而无法直接采用 VBLAST 译码的问题。信号向量和信道矩阵都经过了变化, r_k 为 $2N_R \times 1$ 维向量, s_k 为 $N_T \times 1$ 维向量, H_k 为 $2N_R \times N_T$ 维矩阵。

为简化起见, 将式 (1) 改写成

$$r = Hs + n. \quad (6)$$

同时假定 $2N_R = N_T = M$, 对于这样一个系统, 在误比特率最小的意义下最优译码算法是最大似然检测算

法 (MLD), 根据接收信号的概率密度函数是高斯分布, 可以推出 MLD 算法表达式如下

$$S_{ML} = \arg \max_{A^{N_T}} p(r/Hs) = \arg \min_{A^M} \|r - Hs\|^2.$$

其中 $p(r/Hs)$ 是 r 的概率密度函数, A 是调制星座点构成的集合, 假设其中含有 a 个星座点, A^M 是 N_T 维的 QPSK 星座点集合, 搜索范围为 a^M 个点。

2 DFE-SDR 检测算法

针对 SFD-MIMO-OFDM 系统, 可以采用 SDR 算法等准最大似然检测算法, 但复杂度仍然在 $O(N_T^{3.5})$ 量级, 而采用 DFE 检测算法, 性能很难达到理想水平。这里将 SDR 和 DFE 结合起来, 发挥两种算法的优点, 克服各自的缺点。SDR 和 DFE 的结合可以考虑先进行某些层的 SDR 检测, 然后再对其他层进行 DFE 检测, 但这种算法必须先通过某种变换, 例如 QR 分解, 来得到去掉其他层影响的某些层的输入输出关系供 SDR 检测之用。用变换进行删除影响的方法性能比之串并行干扰删除要差, 因此这里考虑先进行 DFE 检测, 即并行干扰删除算法以得到初步的估计值, 再对删除掉其他层影响的信噪比较低的几层进行 SDR 检测, 以提高译码准确性, 最后还可以采用 DFE 检测进行最后的验证, 以降低误码传播, 此即 DFE-SDR 算法。这种算法能较大地提高系统的最低分集增益, 性能较 DFE 会有较大提升。

首先要对 H 矩阵及 s 向量进行排序, 即将 H 各列或 s 各元素按信噪比由小到大排列。用 H_q 表示排序后的矩阵, 用 s_q 表示排序后的向量。新表达式如下

$$r = H_q s_q + n. \quad (8)$$

对式采用 DFE 算法进行初步检测得到粗估计值 \hat{s} , 可以采用串行或并行干扰删除算法, 这里采用效率较高的并行干扰删除方式进行检测。

设 $G_q = H_q^+$, 可以得到初始解 $s_{k,0} = Q(G_q r)$, 然后通过式 (9) 同步进行干扰删除译码

$$s_{n,k} = Q([H_q]_k^T (r - \sum_{i=1, i \neq n}^N s_{i,k-1} [H_q]_i)) \quad n = 1, 2, \dots, M. \quad (9)$$

其中 $[H_q]_k$ 表示 H_q 的第 k 列, k 代表迭代次数。

然后, 考虑 s 的后 m 层信号的准确性问题。通过删除前 $M-m$ 层信号的影响, 得到新的只和后 m 层信号有关的接收向量:

$$r_m = r - H_{M-m} s_{M-m}. \quad (10)$$

其中 H_{M-m} 表示 H_q 的前 $M-m$ 列组成的矩阵,

s_{M-m} 表示 s_q 的前 $M-m$ 个元素组成的向量,下面 H_m 和 s_m 的含义同理。则后 m 层信号的输入输出关系为 $r_m = H_m s_m + n_o$ 。引入 SDR 思想,设 $s_m = Wx$, 其中 W 是线性调制矩阵, x 是 +1、-1 组成的新发送向量。定义 $G = H_m W$, 则新的输入输出关系为

$$r_m = Gx + n_o \quad (11)$$

经过一系列变形,同时松弛掉秩 1 的条件,可以得到如下 SDP 问题

$$\begin{cases} \max & \text{trace}(YQ) \\ \text{s. t.} & Y \succeq 0 \\ & Y_{ii} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (12)$$

其中 $Y = yy^T$, $y = [x^T \quad c]^T$, c 是一个在 $[-1, +1]$ 取值的常数; $Q = \text{Re}(T)$, T 是一个 G 和 r_m 组成的矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} -G^H G & G^H r_m \\ r_m^H G & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

用内点算法求解式可以得到 s_m 的估计值 \hat{s}_m 。

得到后 m 层新的译码结果,替换掉 \hat{s} 中的后 m 个元素即得新的译码结果。

最后,以后 m 层新的译码结果为基础,对前 $M-m$ 层信号进行 DFE 译码,可以得到更精确的信号。

假定将排序后信噪比较低的 $N_T/2$ 层信号经由 SDR 算法译码,其他 $N_T/2$ 层信号由 DFE 算法译码,则由于 DFE 和 SDR 算法的复杂度各在 $O(N_T^2)$ 和 $O(N_T^3)$ 层级,因此分步 SDR 算法较之 SDR 算法复杂度将下降约 6~7 倍。

3 仿真

为了证明在 SFD-MIMO-OFDM 系统中应用 DFE-SDR 算法的有效性,需要进行系统仿真。仿真参数设置如表 1 所示,仿真中假定信道已经精确预测,不考虑同步问题。

表 1 仿真参数表

Parameter	Values
Banwidth	20 MHz
Num. of sub-carriers	128
Modulation	QPSK
Doppler frequency	20 Hz
(Tx Ant., Rx Ant.)	(4, 2)
Channel model	Rayleigh, Exp. 5 path

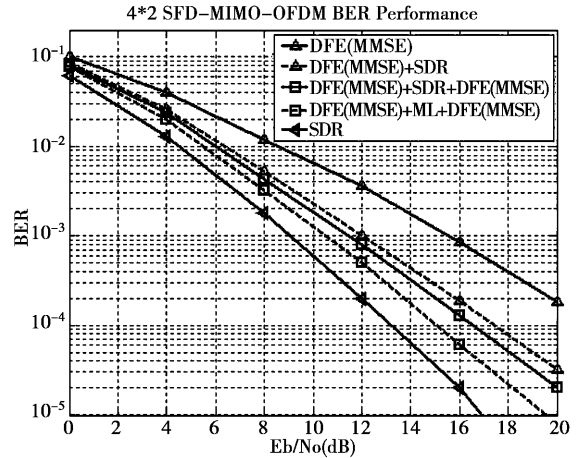


图 2 SFD-MIMO-OFDM 系统不同算法仿真图

图 2 比较了 SFD-MIMO-OFDM 系统在不同检测算法下的误码率性能,这里 DFE 均采用 MMSE 并行干扰删除算法,同时取 $m=2$ 。首先,从图中可以看出,系统应用 DFE-SDR 检测的 BER 性能好于只采用 DFE 检测的性能,在 10^{-3} 误码率情况下,信噪比需要值减少了 4 dB,在 DFE-SDR 检测的基础上再采用 DFE 算法验证也可以提高性能。和 DFE-ML 及 SDR 算法相比,DFE-SDR 性能要差一些,但复杂度降低不少。

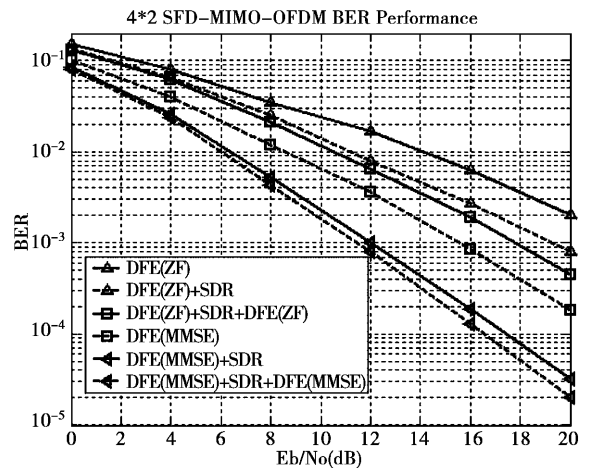


图 3 SFD-MIMO-OFDM 系统不同 DFE 算法仿真图

图 3 比较了在 SFD-MIMO-OFDM 系统采用 DFE(ZF)-SDR 算法以及 DFE(MMSE)-SDR 算法的比较。从图中可以看出采用 DFE(MMSE)检测比采用 DFE(ZF)检测要好一些,在 10^{-3} 误码率情况下,信噪比需要值减少了 5 dB。同样,在 DFE(ZF)-SDR 以及 DFE(MMSE)-SDR 检测后加 DFE 验证可以提高系统的误码率性能。

4 结论

笔者提出了一种综合利用空间分集、空间复用、频率复用增益的 SFD-MIMO-OFDM 系统结构,并结合判决反馈均衡(DFE)以及半定松弛检测(SDR)的优点,经过推导得到一种应用在空时频率分集 MIMO-OFDM 系统的 DFE-SDR 检测方法,该算法能同时得到较理想的系统性能和算法复杂度。系统仿真证明,该方法与 DFE 检测算法相比,在复杂度可控的情况下,误码率性能得到了较大提高,是一种有实用价值的译码算法。相信在未来的 3G、4G 移动通信中,这种算法将得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] BIGLIERI, E, TARICCO, G, TULINO. A Decoding space time codes with BLAST architectures [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(10): 2547-2551.
- [2] MAHESH L, PRABHU K. Particle filtering detection in SF-BC coded BLAST-OFDM systems [C]. IEEE ICPWC, 2005: 130-133.
- [3] VERDU. S Multiuser detection [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [4] WUBBEN, ROHNKE. D J Efficient algorithm for decoding layered space-time codes [J]. IEEE Electronic Letters, 2001, 37(22): 1348-1350.
- [5] WANG, LU, X, M, ANTONIOU. W S A An near-optimal multi-user detector for CDMA systems using semi-definite programming relaxation [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2003, 51: 2446-2450.
- [6] LAAMARI H, BELFIORE J C, IBRAHIM N. Near maximum likelihood detection using an interior point method and semi-definite programming [J]. IEEE ACSSC, 2004(1): 223-226.
- [7] R F H FISCHER, C WINDPASSINGER, Real vs. Complex Valued Equation in V-BLAST Systems [J]. IEE Electronics Letters, 2003, 39(5): 470-471.
- [8] GOLDEN G D, FOSCHINI C J, VALENZUELA R A, et al. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture [J]. Electronics Letters, 1999, 35(1): 14-16.

Two-phase SDR Detector for SFD-MIMO-OFDM System

YANG Bin, GONG Ping, LI Yong-hua, WU Wei-ling

(School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract : A spatial multiplexing and diversity joint transmit structure for MIMO-OFDM system is proposed. Space-Frequency Block Coding (SFBC) is used over the system 's spatial multiplexing layers to obtain both space diversity and frequency diversity (SFD) gain. According to the idea of DFE and SDR detection, a joint DFE and SDR detection algorithm for SFD-MIMO-OFDM system is also proposed. The algorithm can achieve a good balance of complexity and BER performance. Simulations prove that the BER performance improved greatly compared with generic DFE detector after the algorithm is applied in SFD-MIMO-OFDM system.

Key words : SFD ; MIMO ; OFDM ; DFE-SDR ; algorithms

(编辑 张小强)