

改善 V-BLAST/OFDM 系统性能的子载波分配研究^{*})

肖 啸 朱光喜 胡臻平

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要 为了提高多用户 V-BLAST/OFDM 系统的整体性能,我们研究在不同检测方式下的子载波分配准则,并利用矩阵和排序统计的知识对系统性能及取得的多用户分集增益做了定量分析,得到多用户分集增益的数学表达式。仿真结果表明,本文提出的动态子载波分配准则可以有效地利用多用户分集,明显提高 V-BLAST/OFDM 系统的整体性能。另外,本文与空间分集系统中取得的多用户分集增益进行了仿真比较,表明将基于 V-BLAST 的多用户 OFDM 系统与子载波分配相结合更能改善系统的整体性能。

关键词 V-BLAST,子载波分配,多用户分集,空分复用

Study of Subcarrier Allocation for Improvement of V-BLAST/OFDM System's Performance

XIAO Xiao ZHU Guan-Xi HU Zhen-Ping

(Dept. of Electronics and Information Engineering, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074)

Abstract In order to improve the V-BLAST/OFDM systems' performance, we study the subcarrier allocation arithmetic with different detection mode and the obtained multi-user diversity gain. Using the theory of the order statistics and random matrices, we analyse the system's performance and got the multi-user diversity gain's math expression. Simulation results indicate that the proposed subcarrier allocation arithmetic can exploit multi-user diversity effectively and improve the V-BLAST/OFDM systems' performance prominently. Moreover, compared to the spatial diversity systems, simulation results also demonstrate that subcarrier allocation with V-BLAST/OFDM can improve the system performance further.

Keywords V-BLAST, Subcarrier allocation, Multi-user diversity, Spatial multiplexing

1 引言

由于 V-BLAST (Vertical BLAST) 系统实现简单,又可以接近 MIMO 系统的理论信道容量,故成为目前国内外研究最多的空间复用技术之一^[1]。V-BLAST 系统将高速的数据流转变为—组低速的数据流,各自经过编码、调制之后在不同的天线上同时发送出去,在接收端利用无线信道中丰富的弥散效应来区分不同天线的信号。其多天线主要是用来提高传输速率,分集增益很难获得保证,故通常 V-BLAST 系统的性能比较差^[2,3]。近年来,很多研究者试图从接收检测方式^[2]、自适应调整^[3]等链路级角度出来改善其性能。与以前的很多研究不同,本文从系统级的角度出发,利用多用户分集来改善 V-BLAST/OFDM 系统的整体性能。以 V-BLAST 结构提供空间复用增益,而通过动态分配 OFDM 子载波来提供多用户分集增益,从而保证以高频谱效率进行传输的同时,优化系统的性能。文中分别推导和分析了基于迫零 (Zero-Force, ZF) 和连续干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC) 两种检测模式下的子载波分配准则。理论分析和仿真结果表明,基于 ZF 检测的子载波分配准则也同样适用于 SIC 检测。还与空间分集系统中的自适应子载波分配技术做了比较。

2 系统模型

我们研究一个包含 K 个用户的 FDD 下行 OFDM 系统,基站端配置 M 根天线,每个移动台配 N 根天线。假设每个

移动台能够获得正确的信道信息,并按照算法的要求将特定的信道信息无时延、无差错地反馈给基站。考虑到实现的复杂度,本文重点研究每个子载波只分配给一个用户的情况。引入布尔变量 w_m^k 来表示子载波的分配情况, $w_m^k = 1$ 表示子载波 m 被分配给用户 k ,反之亦然。为了简化表示,省略 OFDM 符号的序号。定义 $N \times M$ 阶矩阵 H_m^k ,其中的元素对应于用户 k 在子载波 m 上不同发射接收天线对之间平坦且相互独立的信道的频率响应值。故接收端第 m 个子载波上的信号可以表示为

$$y_m = \sum_{k=1}^K \sqrt{\frac{E_s}{M}} w_m^k H_m^k s_m^k + n_m \quad (1)$$

其中, s_m^k 是第 m 个子载波上传输给第 k 个用户的符号, E_s 是每个子载波上所有发射天线传输信号的总能量, y_m 和 n_m 分别表示 $N_r \times 1$ 的接收信号向量和噪声向量。 n_m 中的每个元素是独立同分布的复高斯随机变量,均值为 0,方差为 N_0 。

3 基于 V-BLAST/OFDM 系统的子载波分配

3.1 基于 ZF 检测的子载波分配准则

V-BLAST 发射端分别在不同的天线上发送独立的调制符号,通常把每一路独立的数据流称为“层”。在这里,我们采用每一层的检测后信噪比作为衡量性能的参数^[4]。在单用户环境下,由于 ZF 接收机对各层发射数据的检测是独立进行的,整体检测性能主要由检测后信噪比最差的层来决定,有不等式^[5]:

^{*} 高技术发展研究基金资助项目 (No. 2003AA12331005)、国家自然科学基金项目 (No. 60496315)。肖 啸 博士研究生。

$$\rho_{\min}^Z \geq \frac{E_s}{NM_0} \lambda_{\min}[(H_m^H H_m)] \quad (2a)$$

$$= \frac{E_s}{MN_0} \sigma_{\min}^2(H_m) \quad (2b)$$

其中 $\sigma(\cdot)$, $\lambda(\cdot)$ 分别表示矩阵的奇异值和特征值。从式(2)可以发现,检测后信噪比最差层的性能可以用信道矩阵 H_m 的最小奇异值来度量。优化这个量,就能够改善最差层的检测性能,从而改善整体的检测性能。故为优化多用户 V-BLAST/OFDM 系统级的性能,将每个子载波分配给在其上面最差层性能最好的用户。根据式(2),得子载波分配准则如下:

$$\omega_m^k = \begin{cases} 1 & k = \arg \max_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} \{\lambda_{\min}[(H_m^H H_m)]\} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3a)$$

或

$$\omega_m^k = \begin{cases} 1 & k = \arg \max_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} \{\sigma_{\min}(H_m)\} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3b)$$

3.2 基于 SIC 检测下子载波分配准则

SIC 检测中如果知道检测顺序,可以用 QR 分解^[6]对排序的 SIC 算法进行性能分析^[7]。令信道矩阵 H_m^k 的 QR 分解为

$$H_m^k = Q_m^k R_m^k \quad (4)$$

其中 Q_m^k 是一个酉矩阵, R_m^k 是一个上三角矩阵,其第 i 个对角线元素为 $(r_m^k)_{ii}$ 。在单用户系统中,对式(1)中的接收信号左乘 $(Q_m^k)^H$ 。假设检测顺序是从符号 x_M 到符号 x_1 ,且当我们检测第 i 层的时候,前面检测的 $i-1$ 层数据的影响都被正确地估计并消除了,则可以得到第 m 子载波上,对于用户 k ,经过 SIC 检测,第 i 层的检测后信噪比:

$$\rho_k = \frac{E_s}{MN_0} |(r_m^k)_{ii}|^2, i=1, \dots, M \quad (5)$$

同理(3),得 SIC 检测下的子载波分配准则如下:

$$\omega_m^k = \begin{cases} 1 & k = \arg \max_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} \{\min_i [|(r_m^k)_{ii}|^2]\} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

如果我们把检测顺序所构造的置换矩阵设为 P ,右乘信道矩阵,然后做 QR 分解如下:

$$H_m^k P = Q_{m,p}^k R_{m,p}^k \quad (7)$$

根据前面的分析,知矩阵 $R_{m,p}^k$ 的第 i 个对角线元素的平方 $|(r_{m,p}^k)_{ii}|^2$ 就可以用来衡量第 i 层的检测后信噪比。

对于信道矩阵 H_m^k ,它的最小奇异值满足如下关系:

$$\sigma_{\min}^2(H_m^k) = \lambda_{\min}[H_m^k (H_m^k)^H] \quad (8a)$$

$$= \lambda_{\min}[H_m^k P (H_m^k P)^H] \quad (8b)$$

$$= \lambda_{\min}[R_{m,p}^k (R_{m,p}^k)^H] \quad (8c)$$

$$= \sigma_{\min}^2(R_{m,p}^k) \quad (8d)$$

其中,(8b)式来自于 $P^H P = I$ 。已知对于某个矩阵 G ,其最小特征值和最小奇异值满足如下关系^[6]

$$|\lambda_{\min}(G)| \geq |\sigma_{\min}(G)| \quad (9)$$

利用上三角矩阵 $R_{m,p}^k$ 的特征值即为其对角线元素的特性,结合(8)式和(9)式,我们可以得到

$$\min_i |(r_{m,p}^k)_{ii}|^2 = |\lambda_{\min}(R_{m,p}^k)|^2 \quad (10a)$$

$$\geq \sigma_{\min}^2(R_{m,p}^k) \quad (10b)$$

$$= \sigma_{\min}^2(H_m^k) \quad (10c)$$

从以上分析,我们可以得出这样的结论:对于 SIC 接收机而言,无论它使用怎样的检测顺序,以信道矩阵 H_m^k 的最小奇异值为准则,将第 m 个子载波分配给在其上 $\sigma_{\min}^2(H_m^k)$ 最大的用户 k ,可以保证最差层的检测后信噪比的下界是最大的。由于 SIC 检测的整体性能是各层的检测结果相互制约、共同作用

的,然而优化最差层的性能,使其下界最大化,显然能够使所有层的检测后信噪比都不至于很差,对于优化总的检测性能是有意义的。因此,可以认为,从 ZF 检测推导出的基于信道矩阵 H_m^k 的最小奇异值最大化的子载波分配准则,同样适用于 SIC 检测。这个结论在随后的仿真结果中也将得到验证。

4 性能分析

我们将从分析矩阵 $(H_m^k)^H H_m^k$ 最小特征值的统计特性入手,给出经过子载波分配之后最差层检测后信噪比的分布函数(CDF),从而研究 V-BLAST/OFDM 系统中多用户分集带来的增益。通常,空间复用系统都满足 $M \leq N$ 的条件, $N \times M$ 阶矩阵 $(H_m^k)^H H_m^k$ 服从 Wishart 分布^[8]。由于用户位置的随机性,各个用户在各个子载波上有相同的统计特性,所以只需对单个用户在单个子载波上的情况进行分析即可。省略子载波和用户的序号,将第 m 个子载波上第 k 个用户矩阵 $(H_m^k)^H H_m^k$ 的第 i 个特征值简记为 λ_i 。根据文[8]、[9]可知,未经排序的 Wishart 矩阵特征值的联合概率密度函数 $f_\lambda(\lambda_1 \cdots \lambda_M)$ 为:

$$f_\lambda(\lambda_1 \cdots \lambda_M) = \frac{[\prod_{i=1}^M \lambda_i]^{N-M} \exp(-\sum_{i=1}^M \lambda_i)}{M! [\prod_{i=1}^M (M-i)! (N-i)!]} \times [\prod_{1 \leq i < j \leq M} (\lambda_i - \lambda_j)^2], \quad (11)$$

$$\lambda_1 \cdots \lambda_M \geq 0$$

令矩阵 $(H_m^k)^H H_m^k$ 的最小特征值的概率分布函数(CDF)为 $F_{\lambda_{\min}}(t)$,则它满足关系:

$$F_{\lambda_{\min}}(t) = 1 - P(\lambda_1 > t, \lambda_2 > t, \dots, \lambda_M > t) \quad (12)$$

由式(11)、(12),类似于文[9]中的推导,可以得到最小特征值的分布函数为

$$F_{\lambda_{\min}}(t) = 1 - \frac{\det(S(t))}{\prod_{i=1}^M (M-i)! (N-i)!} \quad (13)$$

其中 $(S(t))_{i,j} = \Gamma(N-M+i+j-1, t)$,而 $\Gamma(a, t)$, $a=1, 2, \dots, t > 0$ 是“上”不完全的 gamma 函数^[10]。从而获得最小特征值的概率密度函数: $f_{\lambda_{\min}}(t)$:

$$f_{\lambda_{\min}}(t) = \frac{d}{dt} F_{\lambda_{\min}}(t) \quad (14a)$$

$$= -\frac{1}{\prod_{i=1}^M (M-i)! (N-i)!} \frac{d}{dt} \det(S(t)) \quad (14b)$$

因各用户在各个子载波上的信道矩阵 $(H_m^k)^H H_m^k$ 的最小特征值独立同分布,利用排序统计理论就可以得到: K 个用户信道矩阵 $(H_m^k)^H H_m^k$ 的最小特征值的最大值的概率密度函数 $f_{\lambda_{\min,K}}(t)$ 和分布函数 $F_{\lambda_{\min,K}}(t)$ 分别为

$$f_{\lambda_{\min,K}}(t) = K f_{\lambda_{\min}}(t) F_{\lambda_{\min}}^{K-1}(t) \quad (15)$$

$$F_{\lambda_{\min,K}}(t) = [F_{\lambda_{\min}}(t)]^K \quad (16)$$

相应地,根据(2)式可知,子载波分配后最差层的检测后信噪比的分布函数 $F_{\rho_{\min,K}}(u)$ 为

$$F_{\rho_{\min,K}}(u) = [F_{\lambda_{\min}}(\frac{MN_0}{E_s} u)]^K \quad (17)$$

这样,在没有子载波分配调度时,由式(2)、(14)得平均最差层的检测后信噪比的下界为:

$$\bar{\rho}_{\min}^Z = \frac{E_s}{MN_0} \int_0^\infty x f_{\lambda_{\min}}(x) dx \quad (18)$$

而进行子载波分配调度后,由式(2)、(16)得平均最差层的检测后信噪比的下界为:

$$\frac{\overline{\rho_{\min,K}^{ZF}}}{MN_0} = \frac{E_s}{MN_0} \int_0^\infty x f_{\lambda_{\min,K}}(x) dx \quad (19a)$$

$$= \frac{KE_s}{MN_0} \int_0^\infty x f_{\lambda_{\min}}(x) F_{\lambda_{\min}}(x)^{K-1} dx \quad (19b)$$

这样,由式(18)、(19)可以定义所取得的多用户分集增益为:

$$\delta = \frac{\overline{\rho_{\min,K}^{ZF}}}{\overline{\rho_{\min}^{ZF}}} \quad (20a)$$

$$= K \frac{\int_0^\infty x f_{\lambda_{\min}}(x) F_{\lambda_{\min}}(x)^{K-1} dx}{\int_0^\infty x f_{\lambda_{\min}}(x) dx} \quad (20b)$$

可见,这里的多用户分集增益是一个与用户个数、发射天线数、接收天线数、信噪比等有关的函数。至于基于 SIC 检测的子载波分配准则,文[1]已证明检测顺序很重要,最优检测顺序需要通过迭代方式来确定。因此,很难定量地对 SIC 检测进行性能分析。

5 仿真和讨论

因为在文[11]、[12]中,基于波束成型和空时码的 MIMO-OFDM 系统中的子载波分配准则设计目标也都是用来改善系统级的性能,它们与本文所讨论的子载波分配有什么不同呢?我们将通过仿真实验结果来进行比较和分析。在随后的仿真中,也将考虑多个用户同时占用一个子载波的分配方式,以做比较。我们把 Heath 等在单载波系统中提出以 $[(H^H H)]_{ii}^{-1}$ 最小为准则的分配算法^[13]应用到多用户 V-BLAST/OFDM 系统中来,即将子载波 m 上的第 i 根天线分配给对应 $[(H_m^H H_m)_{ii}]_{ii}^{-1}$ 值最小的用户 k ,以优化子载波上每个空间子信道的性能。

仿真采用 IMT-2000 车载 A 四径瑞利衰落信道。设每个用户的移动速度为 30km/h。总的传输带宽为 5M,1 个 OFDM 符号包含 256 个子载波,将每个符号最后的 20 个采样点添加到符号的开头作为循环前缀,以消除符号间串扰(ISD)。仿真中,除非特别说明,基站端和每个移动台端都安装 4 根天线。各个天线使用相等的功率传输,调制方式都采用 QPSK。

仿真 1:动态子载波分配策略的性能比较

仿真了一个 5 用户的系统,并画出了所有用户的平均 BER 对 $E_s/(MN_0)$ 的性能曲线。其中静态子载波分配方案记为 FSA,式(3)、(6)中所提出的动态子载波分配准则记为 DSA。对于静态与动态的子载波分配方案,分别在 ZF 和 SIC 接收机下进行了仿真。为了与多个用户同时占用一个子载波的分配方式比较,在 ZF 检测下,仿真了 Heath 算法在多用户 V-BLAST/OFDM 系统中的性能,记为 Shared DSA ZF。如图 2 所示。

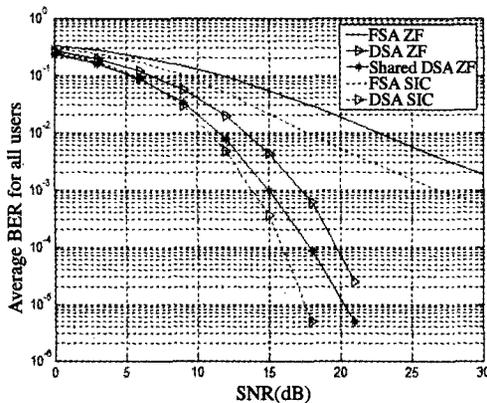


图 2 动态子载波分配的性能比较

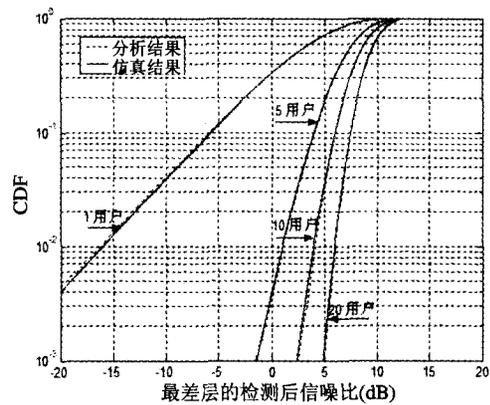


图 3 不同用户数下动态子载波分配的性能比较

从图 2 中可以看出,本文提出的动态子载波分配策略无论是在 ZF 还是在 SIC 接收机下,相对于静态的分配方案都有很大的性能增益。当系统中用户的平均误码率在 10^{-3} 时,两种检测方式下的性能增益都在 15dB 左右。这说明本分配算法有效利用了系统中的多用户分集,使得在保证高频谱效率的基础上,明显地改善了系统的整体性能。同时,正如前文所分析的,仿真结果也说明,基于 ZF 检测推导出的子载波分配准则同样适用于 SIC 检测。

与此同时,同样在 BER 为 10^{-3} 时,基于波束成型和空时码的 OFDM 系统中应用动态子载波分配带来的增益大约都是 6dB 左右^[11,12]。而在本文的空间复用系统中,这个增益是 15dB 以上。这一方面说明,尽管阵列增益或空间分集的目标都是提高接收信噪比,都试图去减少由于衰落所造成的信道状况的大范围波动,但系统仍然存在多用户分集增益值得去挖掘。另一方面也说明,相对而言在空间复用 V-BLAST 系统中,利用动态子载波分配技术来获取多用户分集,具有更大的性能改进空间。因为 V-BLAST 系统与空间分集和波束成型系统不同,它将空间自由度主要用于提高系统的频谱效率,而非改善性能。故虽同样都是 MIMO 系统,但在 V-BLAST 系统中,并没有因为多天线的引入而削弱信道的衰落,相反它利用信道的衰落使得空间子信道的独立性得以实现。因此,在将多用户的 V-BLAST/OFDM 系统与子载波分配技术相结合的系统,链路级上利用 OFDM 对抗多径,在每个子载波的平坦衰落信道上利用 V-BLAST 获取空间复用增益;而在系统级上则采用子载波分配技术获取多用户分集增益,以改善系统的整体性能,从而可以同时获得分集和复用增益。

此外,从图 2 中还可以看出,在相同的 ZF 检测下,尽管多个用户同时占用一个子载波的分配方式,与本文提出的分配方式又提供了大约 2dB 的额外性能增益,但是它所付出的代价是 M 倍的反馈开销和比较运算。而本文提出的每个子载波只分配给一个用户的分配方式,相对于静态分配已经有了很大的性能增益,因此在实际系统中更为实用和简单。

仿真 2:用户数对于我们的子载波分配准则的影响

在用户数分别为 1、5、10 和 20 个, $\frac{E_s}{N_t N_0} = 10\text{dB}$ 的情况下,根据上面推导的动态子载波分配后最差层检测后信噪比的分布函数表达式(17),分别画出了相应的理论曲线,并通过 Monte-Carlo 仿真给出仿真曲线。如图 3 所示,可以看到,理论分析的结果和仿真曲线非常匹配,这说明我们的性能分析是正确的。正如所预期的那样,随着用户数的增加,信噪比的

(下转第 57 页)

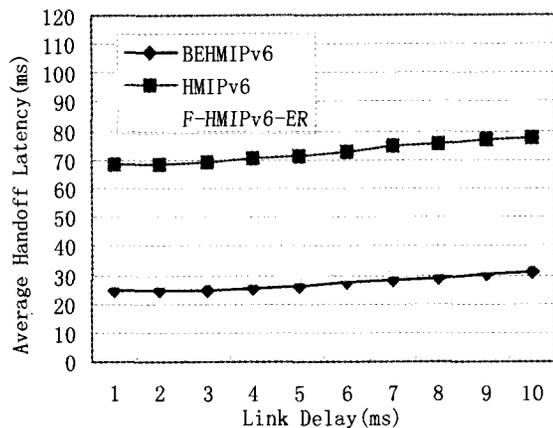


图3 平均延迟比较

②切换平均分组丢失数变化情况如图4所示。仿真中三者TCP数据流的发送间隔相等,那么分组丢失数与切换延迟将成正比关系。由于BEHMIPv6的平均延迟最小, HMIPv6平均延迟最大, F-HMIPv6-ER的平均延迟居于两者之间,所以BEHMIPv6的平均分组丢失数最少, HMIPv6的平均分组丢失数最多, F-HMIPv6-ER平均分组丢失数居于两者之间。

结论和下一步工作 针对HMIPv6域间切换对端绑定延迟较大的问题,本文给出了一种基于绑定更新选项的对端绑定方法,该方法具有如下优点:

①通信中断时间短;②收发分组延迟小;③支持实时数据流;④可扩展性好;⑤未带来额外的信令负载和安全隐患。

下一步考虑如何将此绑定方法与快速切换结合起来,实现HMIPv6域间快速无缝切换。

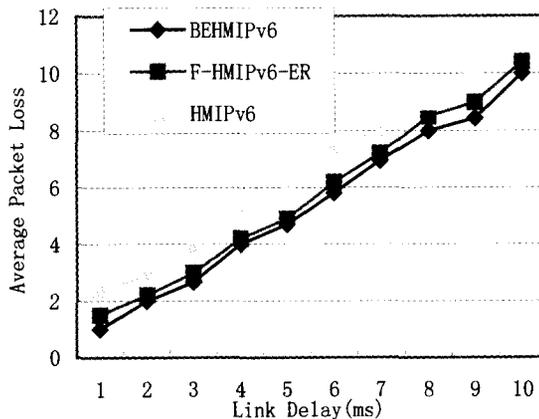


图4 平均分组丢失数比

参考文献

- Soliman H, Catelluccia C, Malki K, et al. Hierarchical Mobile IPv6 mobility management(HMIPv6). RFC4140, 2005
- Johnson D, Perkins C E, Arkko J. Mobility Support in IPv6. RFC 3775, 2004
- 孙利民, 阚志刚, 郑健平, 等. 移动IP技术. 北京: 电子工业出版社, 2003
- 王亮. 基于移动IPv6的多种移交方案分析: [学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2005
- Arkko J, Vogt C. Credit-Based Authorization for Binding Lifetime Extension. Internet Draft draft-arkko-mipv6-bindinglifetime-extension, May, 2004
- http://www.isi.edu/nsnam/ns

(上接第36页)

改善更为明显。因为系统中用户数越多,在每个时刻、每个子载波上就越有可能有某个或者某些用户处于信道状况的峰值,多用户分集增益就越大。图中一个用户的情况就相当于子载波的静态分配,可以发现动态子载波分配带来的性能增益是非常显著的。

结论 数学分析和仿真结果都表明本文提出的动态子载波分配准则可以有效地利用多用户分集,明显提高V-BLAST/OFDM系统的整体性能,并得出了相应的多用户分集增益的具体表达式。与基于波束成型和空时码的MIMO/OFDM系统中的子载波分配相比,在空间复用系统中使用这一技术对性能改善更明显。仿真结果还表明,本文提出的子载波分配方式实现复杂度低,保留了大部分的性能增益,更加实际、可行。

参考文献

- Golden G D, Foschini G J, Valenzuela R A, et al. Detection algorithm and initial laboratory results using the V-BLAST space-time communication architecture. Electronics Letters, 1999, 35 (1): 14~15
- Guo Z, Nilsson P. On Detection Algorithms and Hardware Implementations for V-BLAST. SSocC'02, 2002
- Chung S T, Lozano A, Huang H C. Low complexity algorithm for rate quantization in extended V-BLAST. In: VTC'2001 Fall, vol 2, Atlantic, Oct. 2001. 910~914
- Feng X, Zhu S H, Wu L J. Adaptive bit and power allocation al-

- gorithm in V-BLAST system. In: PIMRC 2004, vol 1, 2004. 489~492
- Heath R, Paulraj A. Antenna selection for spatial multiplexing systems based on minimum error rate. In: Proc IEEE Int Contr Conf, vol 7, Helsinki, Finland, 2001. 2276~2280
- 程云鹏, 张凯院, 徐仲. 矩阵分析与应用(第2版). 西安: 西北工业大学出版社, 1999
- Foschini G J, Golden G D, Wolniansky P W, et al. Simplified processing for wireless communication at high spectral efficiency. IEEE J Select. Areas Commun Wireless Commun. Series, 1999, 17: 1841~1852
- Telatar I E. Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels: [Internal Tech. Memo]. AT&T Bell Labs, June 1995
- Dighe P A, Mallik R K, Jamuar S S. Analysis of transmit-receive diversity in Rayleigh fading. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(4): 694~703
- Proakis J G. Digital Communications(3rd edition). New York: McGraw-Hill, 1995
- Hu Z P, Zhu G X, Xia Y, et al. Multiuser subcarrier and bit allocation for MIMO-OFDM systems with perfect and partial channel information. WCNC, 2004, 2: 1188~1193
- Hu Z P, Zhu G X, Wang D S. Resource allocation for multiuser space-time coding based OFDM systems with QoS provision. VTC 2005 Fall, Dallas, USA
- Heath R, Airy M, Paulraj A. Multiuser diversity for MIMO wireless systems with linear receivers. In: Proc. IEEE Asilomar Conf on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, vol 2, 2001. 1194~1199