

基于自适应调制的改进型 V-BLAST 检测算法研究

冯兴乐 朱世华 武林俊

(西安交通大学信息与通信工程系 西安 710049)

摘要: 根据检测顺序不同, 贝尔实验室垂直分层空时 (V-BLAST) 检测算法分为正序和逆序检测。本文针对自适应调制的特点首次将两种检测算法结合, 提出一种新的混合检测顺序。首先检测调制尺寸已达最大的饱和信道, 然后检测信噪比不能满足最低门限的无效信道, 最后按检测后信噪比距离门限值最近者优先的原则检测剩余子信道。仿真结果表明, 在平均信噪比较高或较低时, 混合检测的频谱效率分别趋于正序或逆序检测, 当信噪比适中时, 新算法的频谱效率优于其它两种算法。

关键词: 贝尔实验室垂直分层空时, 自适应调制, 检测算法, 频谱效率

中图分类号: TN911.23, TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)02-0192-05

Study of Improved V-BLAST Detection Algorithm Based on Adaptive Modulation

Feng Xing-le Zhu Shi-hua Wu Lin-jun

(Dept of Info. and Comm., Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Vertical-Bell Labs Layered Space-Time (V-BLAST) detection algorithm comprises forward and reverse ones according to different detection orders. Combining both algorithms, a novel detection algorithm is presented in this paper in view of the characters of adaptive modulation. New algorithm first detects the saturated channel with maximum modulation size, then detects the invalid channel which does not meet the minimum SNR threshold, finally detects the remaining channel as the criteria minimizing distance between post-detection SNR and threshold set. Simulation results show that the spectral efficiencies of proposed algorithm tend to forward or reverse order at high or low SNR respectively, and outperform the both at middle SNR.

Key words BLAST(Bell Labs Layered Space-Time), Adaptive modulation, Detection algorithm, Spectral efficiency

1 引言

随着移动用户的增多以及无线多媒体业务的发展, 频谱资源显得日趋紧张。因此如何开发高效的编码、调制以及信号处理技术来提高频谱利用率已成为当前移动通信的一个研究热点。近年来提出的多输入多输出(MIMO) 系统就是有效提高无线频谱利用率的最重要方案之一。文献[1]指出, 当各子信道为相互独立的平坦衰落信道时, 系统容量随天线数呈线性增长, 但这只是一个理论上限。实际系统中还需考虑编码调制, 检测等多个环节。在MIMO 系统的研究中, 文献[2]提出的V-BLAST(Vertical-Bell Labs Layered Space-Time) 系统是在不同的天线上发送不同信号, 用尽可能少的冗余度获得最大的传输速率, 将用户发送的数据流分为多个子数据流, 分别由不同天线进行传输, 接收端利用传输信道的空间

特性区分不同的数据流。此时若接收天线数大于等于发射天线数, 可以利用V-BLAST检测算法检测各子数据流。V-BLAST检测算法是将空域的BLAST技术与时域的串行干扰抵消算法(SIC)相结合的时空联合检测技术。

将自适应调制引入到MIMO系统中可以更加充分利用信道资源并提高频谱效率。传统自适应调制的依据是接收天线处检测到的信噪比, 而与V-BLAST检测算法结合的自适应调制的依据是经过多次串行干扰抵消后检测该数据流时的实际符号信噪比(以下简称“检测后信噪比”)。由于多次迭代后未检信号的信噪比会变大, 因此可以更加充分利用信道资源发送更多数据, 达到最大化频谱效率的目标。在MIMO系统中由于各子信道衰落不同, 在接收端的信噪比也有所不同, 存在无效信道和饱和信道。无效信道定义为由于该信道的信噪比太低不能满足BPSK所需的信噪比门限, 此时该信

道不能发送有效数据;饱和信道定义为由于该信道的信噪比大于最高调制尺寸对应的信噪比门限,此时信噪比再提高也不能发送更多数据。

根据检测顺序的不同,V-BLAST系统检测算法又可分为正序检测和逆序检测。文献[2]首次提出最优检测顺序的V-BLAST检测算法(即本文中所指“正序检测”),首先对信噪比最大的信号进行检测判决,然后从总接收信号中减去该信号对其他信号造成的干扰,如此循环往复,直至最后检测出所有子数据流的信息。在文献[2]中由于没有考虑自适应调制,其最优检测的出发点是检测误码率最低,而一般通信系统更注重频谱效率,即在给定目标误比特率或掉话率的前提下,单位小区单位带宽内所能达到的最大传输速率。与此相反,文献[3]提出一种逆序检测算法,即按检测信噪比由弱到强的顺序进行检测。尽管文中采用自适应调制,但是同样关注误码性能,没有考虑频谱效率。两种检测顺序各有不足,当平均信噪比较低时,正序检测不能快速有效地将无效信道变为有效信道,对应的频谱效率较低;当平均信噪比较高时,逆序检测尽管使饱和信道的信噪比升高,但由于该信道已经饱和而不能提高频谱效率。

本文就是从最大化频谱效率为出发点,将上述的正序和逆序检测相结合,提出基于自适应调制的改进型V-BLAST检测算法,首先检测饱和信道,然后再检测无效信道,最后按实际检测后信噪比距离门限值最近者优先的原则对剩余子信道进行检测。每检测出一个子信道,将它对其他信道的干扰抵消后重新计算信噪比,如此反复,直至检测出所有子信道。

2 正序和逆序 V-BLAST 检测算法

假设一个 (M, P) 系统,有 M 个发射天线和 P 个接收天线。信道为准静态平坦 Rayleigh 衰落,各子信道之间相互独立,接收端有理想的信道估计和同步接收。接收信号为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{b} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中 \mathbf{b} 为 $M \times 1$ 维的发射信号向量; \mathbf{H} 为 $P \times M$ 维的信道矩阵; \mathbf{n} 为 $P \times 1$ 维的高斯白噪声,均值为 0,方差为 σ^2 ; \mathbf{r} 为 $P \times 1$ 维的接收信号。在接收端采用基于迫零准则的正序或逆序 V-BLAST 检测算法^[2,3],假设检测顺序 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_M\}$,第 k_i 次检测输出为

$$\hat{b}_{k_i} = \mathbf{w}_{k_i}^T \mathbf{r}_i \quad (2)$$

$$\mathbf{w}_{k_i} = \left(\left[\mathbf{H}_{\bar{k}_{i-1}} \right]^+ \right)_{k_i} \quad (3)$$

其中 $(\cdot)_i$ 和 $(\cdot)_j$ 分别表示矩阵的第 i 列和第 j 行。 $\mathbf{H}_{\bar{k}_{i-1}}$ 表示将 \mathbf{H} 中第 $\{k_1, k_2, \dots, k_{i-1}\}$ 列置零。 $[\cdot]^+$ 表示 Moore-Penrose 伪逆运算,权系数 \mathbf{w}_{k_i} 的取值满足下面迫零条件:

$$\mathbf{w}_{k_i}(\mathbf{H})_{k_j} = \begin{cases} 0, & j > i \\ 1, & j = i \end{cases} \quad (4)$$

这样 \mathbf{w}_{k_i} 只需要与 \mathbf{H} 的部分列 $(k_{i+1}, k_{i+2}, \dots, k_M)$ 正交,共计 $u = M - i$ 列,即与未检信号张成的子空间正交。第 k_i 支数据流经过 $i - 1$ 次干扰抵消后的检测后信噪比用下式表示:

$$\rho_{k_i} = \frac{E[|b_{k_i}|^2]}{\sigma^2 \|\mathbf{w}_{k_i}\|^2} \quad (5)$$

系统的误码性能由检测后信噪比 ρ_{k_i} 决定,由于各子信道的信号符号能量 b_{k_i} 和信道噪声功率 σ^2 相同,因此系统性能只取决于等价增益 $\|\mathbf{w}_{k_i}\|^{-1}$ 。根据 Cauchy-Schwartz 不等式, \mathbf{w}_{k_i} 中的 i 越大,要求与之正交的 \mathbf{H} 的列数 u 越少,等价增益越大^[2],换句话说,V-BLAST 检测算法每迭代一次,信道矩阵中将有一列补零,其它未检子信道的等价增益将变大^[3],即

$$\|\mathbf{w}_{k_i, j}\|^{-1} \leq \|\mathbf{w}_{k_i, j+1}\|^{-1} \quad (6)$$

j 表示迭代次数。整个系统的总信道增益定义为

$$J(k_1, k_2, \dots, k_M) = \sum_{i=1}^M \|\mathbf{w}_{k_i}\|^{-1} \quad (7)$$

根据检测顺序的不同,可以分为正序和逆序两种情况。正序检测是每次检测信噪比最大的信号:

$$k_i = \arg \max_{j \in \{k_1, \dots, k_{i-1}\}} \rho_j = \arg \max_{j \in \{k_1, \dots, k_{i-1}\}} \|\mathbf{w}_j\|^{-1} \quad (8)$$

逆序检测是每次检测信噪比最小的信号:

$$k_i = \arg \min_{j \in \{k_1, \dots, k_{i-1}\}} \rho_j = \arg \min_{j \in \{k_1, \dots, k_{i-1}\}} \|\mathbf{w}_j\|^{-1} \quad (9)$$

下面举例比较两种检测顺序对应的总信道增益,信道矩阵如下:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.6 & 1.7 \\ 1.0 & 0.8 & 0.6 \\ 1.1 & 0.5 & 0.3 \end{bmatrix}$$

经过 3 次迭代,等价增益逐渐升高。具体过程如表 1 所示。此例中正序检测顺序为 $\{3, 1, 2\}$,逆序检测顺序为 $\{2, 1, 3\}$ 。由此可以看出:无论采用正序检测还是逆序检测,每迭代一次,未检信号的等价增益都会变大。即检测后信噪比提高,但使用逆序检测可以获得更大的总信道增益,文献[3]用遍历的方法证明了这一结论的普遍性。

表1 正序/逆序检测对应的等价增益比较

等价增益	正序检测			逆序检测		
	第1子信道	第2子信道	第3子信道	第1子信道	第2子信道	第3子信道
第1次迭代 $\ w_{k,1}\ ^{-1}$	0.372	0.189	0.613	0.372	0.189	0.613
第2次迭代 $\ w_{k,2}\ ^{-1}$	0.654	0.482	—	1.296	—	1.562
第3次迭代 $\ w_{k,3}\ ^{-1}$	—	1.118	—	—	—	1.828
最终等价增益	0.654	1.118	0.613	1.296	0.189	1.828
总信道增益	2.485			3.313		

3 混合检测顺序的 V-BLAST 检测算法

一般通信系统要求接收平均误比特率低于事先确定的目标误比特率,然而 MIMO 系统中各子信道的衰落特性不尽相同,若采用相同的调制类型必将造成系统资源的极大浪费,对于信道质量好的子信道,接收误比特率远低于目标误比特率;对于信道质量差的子信道,接收误比特率高于目标误比特率,不但在接收端无法正确检测,而且还会对其他信道造成干扰。自适应调制是解决这一问题的有效手段^[4]。对于第 k_i 个子信道的自适应调制的步骤如下:

(a) 在接收端根据式(2), (3), (5)计算检测后信噪比 ρ_{k_i} ;

(b) 根据符号信噪比和误码率对应关系的统计公式^[5], 计算满足目标误比特率情况下,对应各种调制类型所需的一系列最小平均信噪比门限集合 $\gamma_s, s \in [0, 1, \dots, S]$; S 为最大调制类型的每符号比特数, $s=0$ 表示不发射数据;

(c) 比较检测后信噪比和一系列平均信噪比门限值,找到满足 $\rho_{k_i} \geq \gamma_s$ 的最大 s 值;

(d) 将 s 值映射为具体的调制类型并反馈到发射端。

具体到 V-BLAST 检测算法中,无论采用正序还是逆序检测,每经历一次干扰抵消,对于尚未检测的子信道的等价增益均会变大,即检测后信噪比提高。在采用自适应调制的系统中检测后信噪比的提高并不等价于频谱效率提高。因为对于无效信道来讲,在信噪比达到 BPSK 对应的最低门限之前一直不能有效发送数据,频谱效率不会增加;对于饱和信道来讲,在信噪比达到最大调制尺寸对应的最低门限之后,即使信噪比再增加也不会增加频谱效率,只会造成误码率的下降;对于非饱和有效信道,信噪比在 $[\gamma_i, \gamma_{i+1})$ 区间内对应的发送速率均为 i 比特/符号。综合上述分析,结合正序和逆序检测的特点,本文提出的混合检测顺序包括以下4个步骤。

(a) 首先检测饱和信道,若饱和信道不止一个,则按信

噪比由强到弱顺序检测(即正序检测)。其余未饱和信道经多次迭代后检测后信噪比逐渐提高,等到检测该信道时可能已变为饱和信道;若首先检测未饱和信道(即逆序检测),其余饱和信道经多次迭代后检测后信噪比尽管有所提高,但由于该信道本来就饱和,即使信噪比再增加也不能增加调制尺寸。因此首先检测饱和信道更有利于提高频谱效率。

(b) 其次检测无效信道,若无效信道不止一个,则按信噪比由弱到强顺序检测(即逆序检测)。尽管无效信道不能传送有效数据,但通过检测无效信道可以使其它信道(包括其余无效信道或非饱和信道)的等价增益升高,文献[3]指出,逆序检测得到的总信道增益大于正序检测,而对于非饱和有效信道,高的信道增益总是对应高的频谱效率。当平均信噪比较低时,大部分信道为无效信道,此时若采用正序检测,对减少无效信道数效果不明显,因为每次总是检测信噪比最高的,尽管每次迭代干扰抵消后未检信道的检测后信噪比有所提高,但越是先检测的信道,迭代次数越少而不能成为有效信道,越是后检测的信道,其原始信噪比越低,由于基数太低而不能成为有效信道;若采用逆序检测,按信噪比由弱到强检测,更为关键的是越是后来检测的信道,其原始信噪比越高且迭代次数越多,越有可能成为有效信道。因此逆序检测对减少无效信道数效果更明显。

(c) 对其余非饱和有效信道,按实际信噪比距离门限值最近者优先的原则进行检测。对于有目标误码率要求的系统来说,对频谱效率的关注胜于误码率,实际信噪比与门限值的差值越小,误码率越接近系统要求的目标误码率,但必须要求实际信噪比不小于门限值,才能保证检测误码率不高于目标误码率,刚好满足要求又不浪费信道增益。把距离门限值较远的子信道留到以后检测,经干扰消除后检测后信噪比极有可能再上一个台阶,达到更高的调制尺寸。因此,对于平均信噪比适中的信道,这一检测顺序最有效。

(d) 每检测出一个子信道后, 将该信道在信道矩阵中对应的一列置零, 相当于消除该信道对其余信道的影响, 然后重新计算剩余子信道的检测后信噪比, 按上述检测顺序寻找下一次应该检测的子信道, 如此反复直至检测出所有信道。混合检测顺序流程如图1所示。

相比于正序或逆序检测, 混合检测的复杂度少量增加, 计算参数时增加调制尺寸 s_{k_i} 和信噪比差值 e_{k_i} 的计算, 以及两次比较运算, 考虑到 V-BLAST 检测算法的复杂度主要在于矩阵求逆, 因此增加的运算量并不算多。

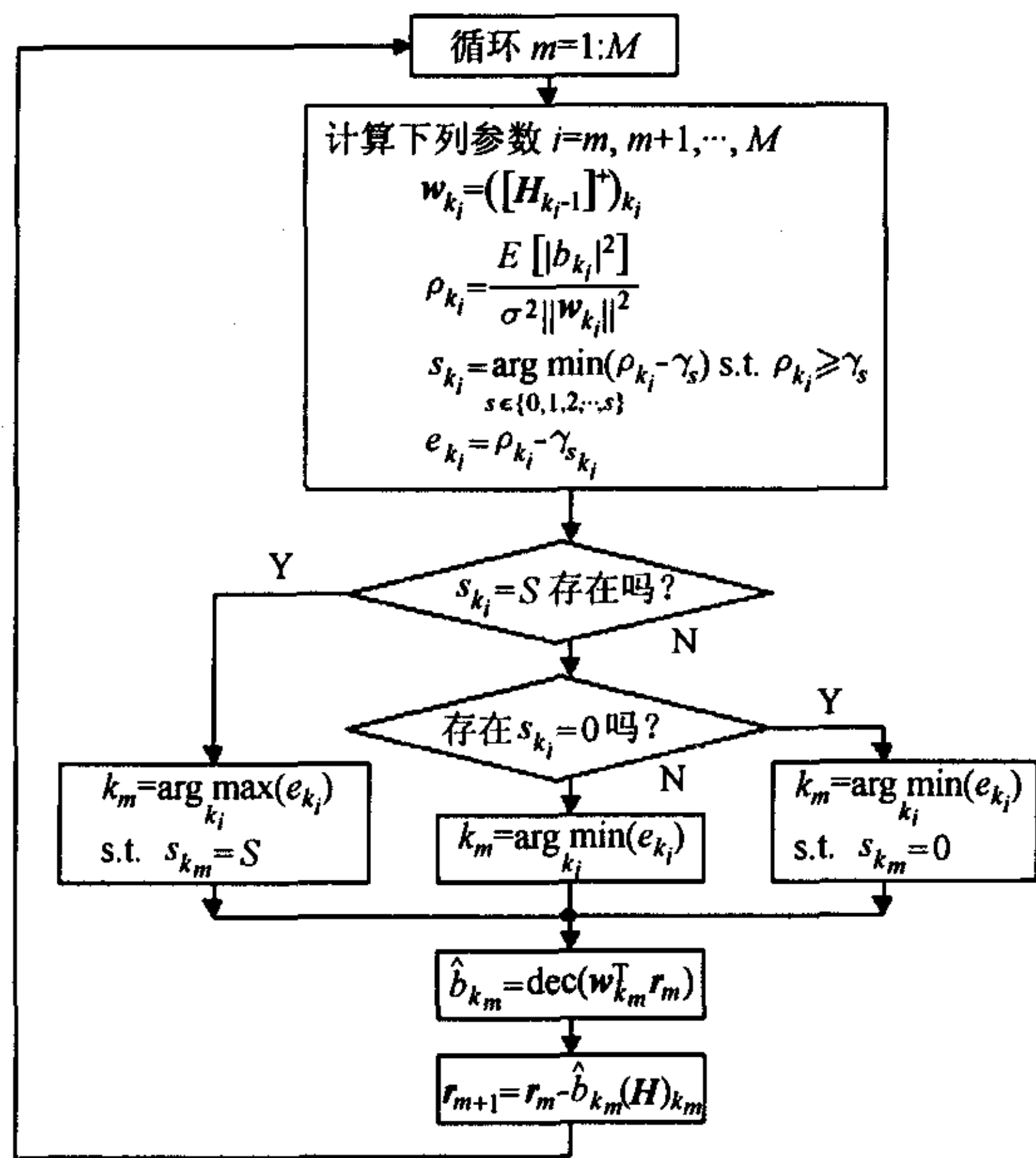


图1 混合检测顺序流程图

4 仿真

假设信道为准静态平坦 Rayleigh 衰落, 具有理想的信道估计和及时反馈信息机制, 目标误比特率 $BER_{\text{target}} = 10^{-3}$, 发射天线数和接收天线数均为 4, $S = 6$, 即对应 $s \in [0, 1, \dots, 6]$, 对应调制类型分别为不发射数据, BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM, 64QAM。频谱效率定义为每个天线单位带宽单位时间内传输的最大比特数。各图中横坐标为接收天线处的平均符号信噪比 SNR。

仿真主要比较采用正序、逆序和本文提出的混合检测顺序对应 3 种检测算法的频谱效率, (以下简称“正序检测”、“逆序检测”和“混合检测”), 为了比较方便, 各图中还列出传统自适应调制对应的频谱效率, 即利用接收天线处测得的原始信噪比进行自适应调制, 采用匹配滤波进行传统检测 (以下简称“传统检测”)。

图 2 反映不同检测顺序对应的频谱效率。可以看出: 无论正序还是逆序检测, 其频谱效率均优于传统检测, 当 $SNR < 22.5\text{dB}$ 时逆序检测优于正序检测, 反之则劣于正序检

测。随着信噪比趋于正 (负) 无穷, 两种算法的频谱效率均趋于上 (下) 界。当最大调制尺寸 S 变大时, 图 2 中各检测算法对应的频谱效率变化规律不变, 只是最大频谱效率上界整体上移。当平均符号信噪比较低时 ($SNR < 17\text{dB}$), 由于大多数信道为无效信道, 饱和信道很少, 混合检测的频谱效率与逆序检测大体相同; 当平均符号信噪比较高时 ($SNR > 30\text{dB}$), 由于大多数信道为饱和信道, 无效信道很少, 混合检测的频谱效率与正序检测大体相同; 当平均符号信噪比处于中等水平时 ($17 \sim 30\text{dB}$), 饱和信道和无效信道都很少, 实际信噪比距离门限值最近者优先检测的原则发挥作用, 这样可以充分利用信道增益, 总而言之, 混合检测的频谱效率优于正序和逆序检测。

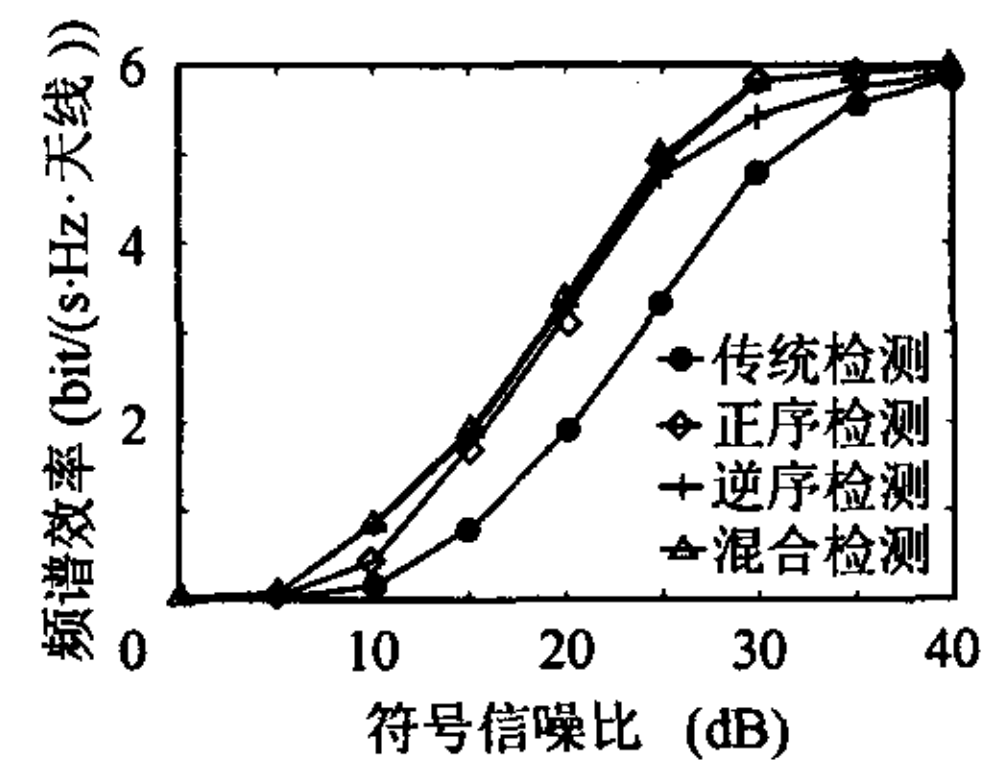


图 2 各种检测算法对应的频谱效率比较

图 3 和图 4 给出饱和信道数与无效信道数随平均符号信噪比变化的曲线, 从另一角度验证了图 2 结果, 此处的无效信道数和饱和信道数均以检测该信道时的实际状态为准。传统检测不进行干扰消除, 图中标出的饱和/无效信道数就是其原始状态; 而正序/逆序检测由于迭代干扰消除后饱和/无效信道数会发生变化, 当平均信噪比较高时, 由于迭代干扰消除后未饱和信道的检测后信噪比逐渐提高, 等到检测该信道时可能已变为饱和信道, 因此正序和逆序检测对应的饱和信道数均高于传统检测, 但正序检测对增加饱和信道数效果更明显, 因此信噪比较高时宜采用正序检测; 同样道理, 在平均信噪比较低时, 迭代干扰消除会使无效信道变为有效信道, 因此正序或逆序检测对应的无效信道数均低于传统检测, 但逆序检测对减少无效信道数效果更明显, 因此信噪比较低时宜采用逆序检测。

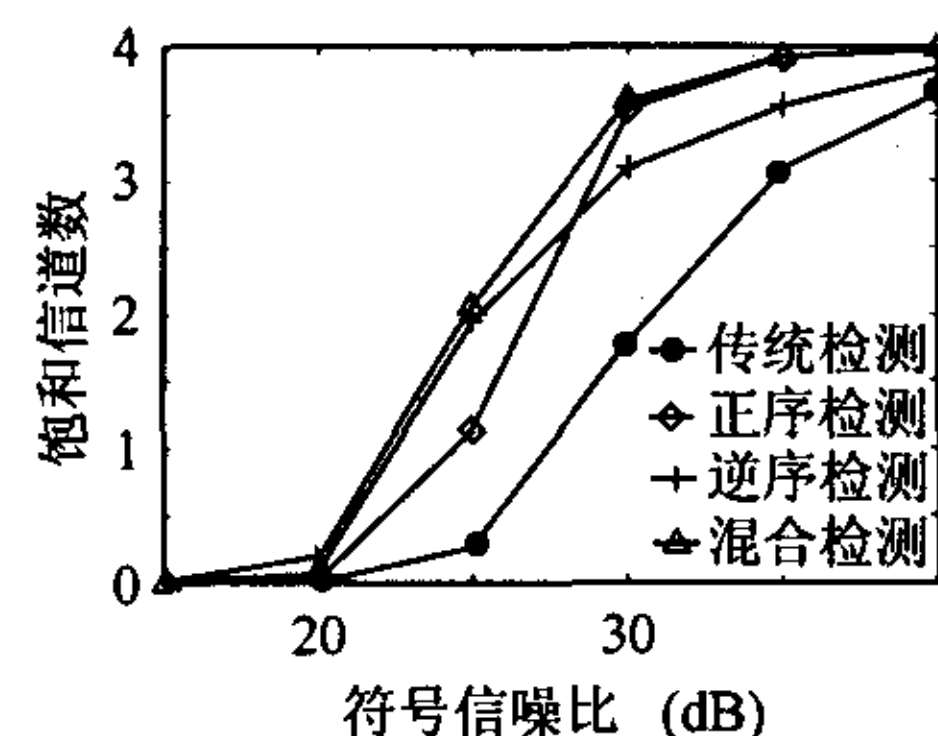


图 3 饱和信道数与符号信噪比的关系

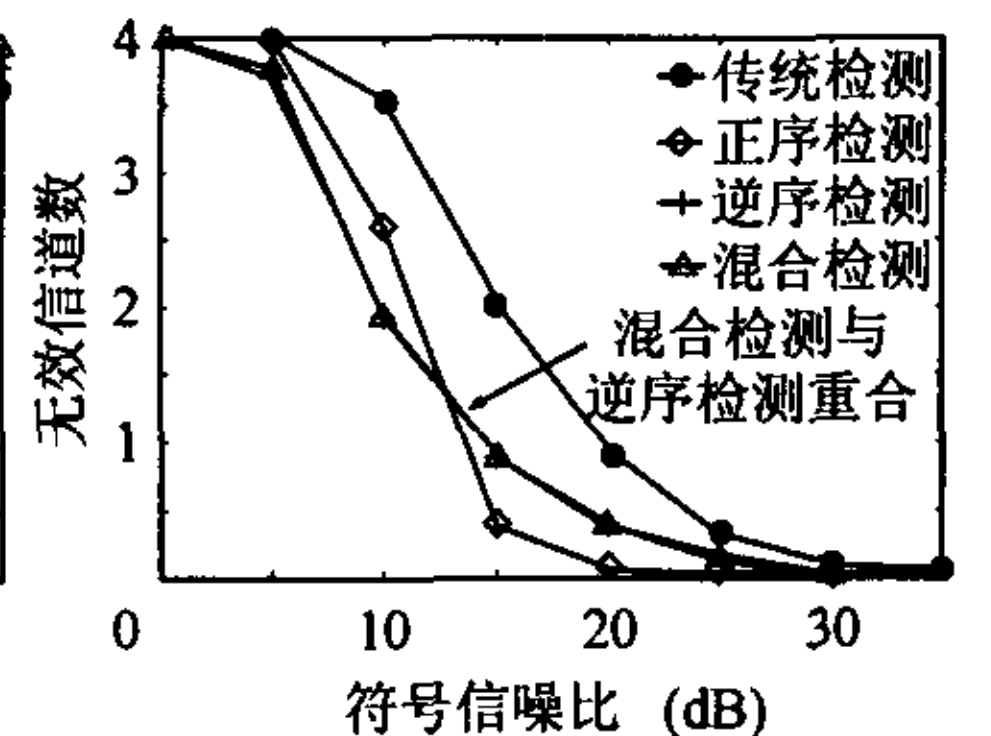


图 4 无效信道数与符号信噪比的关系

图 5 比较 3 种检测顺序对应的总信道增益, 可以看出: 逆序检测的总信道增益最高, 正序检测最低, 混合检测适中。

一旦信道矩阵确定, 正序和逆序检测顺序就不会变化, 总信道增益基本不变, 但是混合检测的总信道增益却随信噪比变化, 信噪比较低时和逆序检测类似, 信噪比较高时又趋于正序检测。结合图2中对频谱效率的比较, 证明了前面所述: 在采用自适应调制的系统中总信道增益的提高并不等价于频谱效率提高。

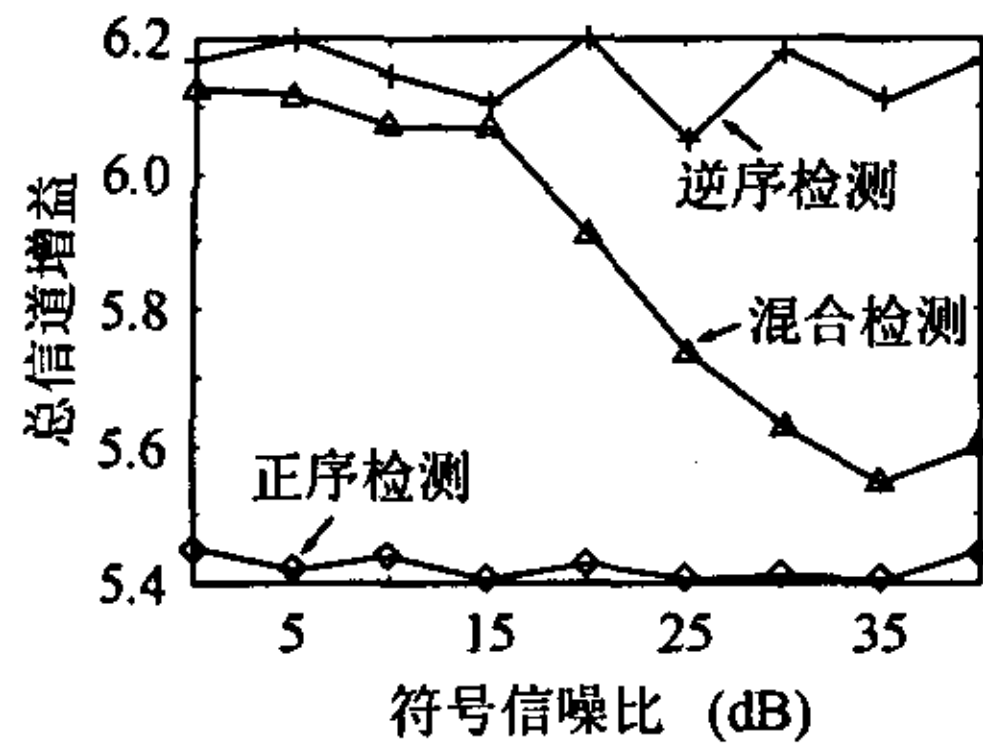


图5 3种检测顺序对应总信道增益比较

5 结论

本文针对采用自适应调制的 V-BLAST 系统, 分析了正序和逆序检测的优缺点并提出一种新的检测算法。首先检测饱和信道, 然后检测无效信道, 最后按检测后信噪比距离门限值最近者优先的原则检测剩余子信道。仿真结果表明, 在平均信噪比较高或较低时, 混合检测的频谱效率分别趋于正序或逆序检测, 当信噪比适中时, 新算法的频谱效率优于其它两种算法。同时也说明总信道增益的提高并不等价于频谱效率提高。该算法在提高频谱效率的同时并不显著增加复杂

度, 但该算法的应用前提是具有理想信道估计的平坦衰落信道且控制信息反馈无时延, 应用到实际系统中还需进一步研究。

参考文献

- [1] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311 - 335.
- [2] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, et al.. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel[C]. Proc. ISSSE-98, Pisa, Italy, 1998: 295 - 300.
- [3] Kim Y D, Kim I Y, Choi J H, et al.. Adaptive modulation for MIMO systems with V-BLAST detection[C]. IEEE VTC 2003-Spring, Jeju, Korea, 2003: 1074 - 1078.
- [4] Catreux S, Erceg V, Gesbert D, et al.. Adaptive modulation and MIMO coding for broadband wireless data networks[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2002, 40(6): 108 - 115.
- [5] Proakis J G. 数字通信[M]. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 1998: 188 - 196.

冯兴乐: 男, 1971年生, 博士生, 研究方向: CDMA 移动通信.

朱世华: 男, 1950年生, 教授、博士生导师, 研究方向: 移动通信、数字传输和程控交换.

武林俊: 男, 1968年生, 博士生, 研究方向: CDMA 移动通信.