

基于可配置型 K-Best 的 MIMO 信号检测器

马小晶, 刘亮, 叶凡, 任俊彦

(复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 201203)

摘要: 为减少高速通信系统中硬件资源的消耗, 设计一种应用于 MIMO-OFDM 无线通信系统中的高速信号检测器, 根据可重构设计的需求, 提出一种简化 K-BEST(SKB) MIMO 信号检测算法, 介绍可配置型硬件结构, 并采用 Xilinx Vertex-4 FPGA 平台加以实现。仿真实验结果表明, 该检测器的最高数据吞吐率可达 2 Gb/s, 并能针对不同星座调制信号(如 QPSK, 16-QAM)进行检测。

关键词: OFDM 技术; MIMO 信号检测器; 可重构结构

MIMO Signal Detector Based on Reconfigurable K-Best

MA Xiao-jing, LIU Liang, YE Fan, REN Jun-yan

(State Key Lab of ASIC & System, Fudan University, Shanghai 201203)

【Abstract】 In order to reduce the hardware consumption in high speed communication system, a high speed Multi-Input and Multi-Output(MIMO) signal detector applied for MIMO-OFDM wireless communication system is presented. According to the the requirement of reconfigurable design, a Simplified K-Best(SKB) algorithm as well as a reconfigurable structure for MIMO signal detector is proposed. The MIMO signal detector is implemented on Xilinx Vertex-4 FPGA platform. Simulation experimental results show the throughput of this detector achieves 2 Gb/s and has the function of demodulating different modulation such as QPSK and 16-QAM.

【Key words】 OFDM; MIMO signal detector; reconfigurable structure

多输入多输出(MIMO)技术在信号发送端与接收端均使用多天线, 通过空间复用方式在同一频带内同时传输多个数据流, 可提供比单天线系统(SISO)更高的频谱效率。在 MIMO 信号检测算法中, K-Best 算法广度优先搜索模式易于并行流水线结构 VLSI 设计, 有利于提高速率。但无论天线数目增加还是星座调制复杂化均使子节点的搜索数量上升, 都会导致硬件复杂度的提高^[1]。同时, 许多无线通信协议采用不同星座调制策略以适应不同信道环境(如 IEEE 802.11n) 这也要求 MIMO 信号检测器能同时检测不同调制方式。

1 相关算法

1.1 传统 K-Best 算法

发送天线数目与接收天线数目均为 N 的 MIMO 通信系统基带信号等效模型为

$$y = Hz + n \quad (1)$$

其中, H 为 $N \times N$ 信道矩阵; $z = [z_1, z_2, \dots, z_N]$ 为 N 维发送信号; $y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$ 为 N 维接收信号; n 为 N 维加性高斯白噪声。为避免复数运算带来额外硬件开销, 可将系统模型(1)实数化分解为 $y' = H'z' + n'$, 即:

$$\begin{bmatrix} R(y) \\ I(y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(H) & -I(H) \\ I(H) & R(H) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(z) \\ I(z) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R(n) \\ I(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $R(*)$ 与 $I(*)$ 分别代表复数(*)的实部与虚部。以最大似然准则求解式(2)可得:

$$\hat{z} = \arg \min_{z \in \Omega^N} \|y' - H'z'\|^2 \quad (3)$$

在 K-Best 算法中, 信道矩阵 H' 经过 QR 分解后得到 $H' = QR$, 则式(3)可以分解为

$$\hat{z} = \arg \min_{z \in \Omega^N} \sum_{i=1}^{2N} \|y_i - \sum_{j=i+1}^{2N} R_{ij}z'_j - R_{ii}z'_i\|^2 \quad (4)$$

其中, Q 为 $2N \times 2N$ 维正交矩阵; R 为 $2N \times 2N$ 维上三角阵; $\hat{y}' = Q^T y'$ 为 $2N$ 维向量。

根据式(4), K-Best 检测算法构造树形搜索方式如图 1 所示(2x2 天线、QPSK 调制、K=4 的 K-Best 算法树形查找结构), 可以看出, 当层数充分大时, 每层需计算、排序的欧氏距离增量的数量为 $K \times [\Omega]$, 其中, Ω 为由调制方式决定的星座点集合, $[\Omega]$ 为集合中元素个数, 当 K 与 $[\Omega]$ 较大时, 计算复杂度会成为硬件实现的瓶颈。

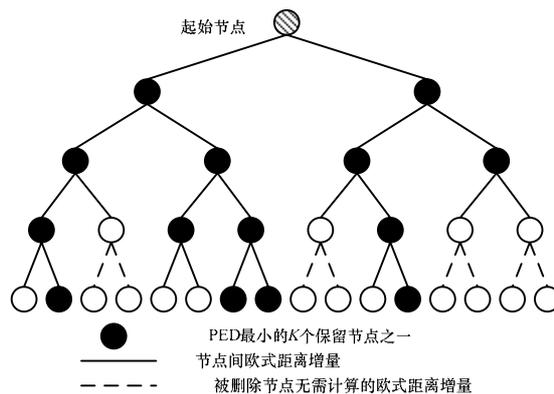


图1 K-Best 检测算法构造树形搜索方式

基金项目: 上海市科委集成电路设计专项课题基金资助项目“超宽带物理层数字基带技术开发及 SOC 实现方法”(077062005)

作者简介: 马小晶(1984-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 无线通信系统数字基带 VLSI 设计与实现; 刘亮, 博士研究生; 叶凡, 讲师、博士研究生; 任俊彦, 教授、博士生导师

收稿日期: 2009-06-20 **E-mail:** 062021054@fudan.edu.cn

1.2 简化型 K-Best 算法

SKB 算法的核心思想是：针对不同检测层的信噪比，采用不同算法以减小硬件资源消耗。

对信道矩阵作 QR 分解后，对角线元素分布呈现 $\gamma = N+1-i$ 的标准 Gamma 分布^[2]，即在概率上，式(4)中层号序列 i 越小，对角线元素 r_{ii} 越大，等效于信噪比越大。因此，SKB 定义临界层数 M ，对层号 $i \leq M$ 的各层节点，为了保持次优最大似然检测性能，采用传统 K-Best 算法；对层号 $i > M$ 的各层节点采用简化算法，以达到减少计算复杂度的目的。基于以上分析，本文提出的 SKB 算法流程如下：

步骤 1(参数定义) PED 为各星座点欧氏距离累加和， inc 为当层节点欧氏距离增量。由信道矩阵分解后上三角阵特性，计算起始层为第 $2N$ 层，计算终止层为第 1 层。

步骤 2(K-Best 计算) 对第 i 层($M < i \leq 2N$)中 K 个上层输出父节点的各 $[\Omega]$ 个子节点进行欧氏距离增量计算，并与上层 PED 累加。排序后，最小的 K 个 PED 及其对应星座点输出至下一层。增量计算与累加计算算法描述如下：若 $1 \leq p \leq K, 1 \leq q \leq [\Omega]$ ，则

$$inc_{i,p,q} = \left\| \hat{y}_i - \sum_{j=i+1}^{2N} R_{ij} z'_j - R_{ii} z'_{i,q} \right\|^2 \quad (5)$$

$$PED_{i,p,q} = PED_{i+1,p} + inc_{i,p,q} \quad (6)$$

步骤 3(简化计算) 对第 i 层($1 \leq i \leq M$)中 K 个上层输出父节点的各 $[\Omega]$ 个子节点做迫零计算，迫零解及其累加 PED 输出至下一层。迫零计算算法描述如下：

若 $1 \leq p \leq K, 1 \leq q \leq [\Omega]$ ，则

$$inc_{i,p} = \min(\| \hat{y}_i - R_{ii} z'_{i,q} \|^2) \quad (7)$$

$$PED_{i,p} = PED_{i+1,p} + inc_{i,p} \quad (8)$$

步骤 4(结果输出) 对第 1 层的 K 个 $PED_{1,p}$ 排序，选出最小 PED 与其相应星座点序列作为最终输出。

1.3 SKB 算法与传统 K-Best 算法性能仿真比较

4×4 天线无信道编码 MIMO 信号检测器，在 QPSK 与 16-QAM 调制方式下，不同 M 值 SKB 算法与传统 K-Best 算法的 Monte Carlo 仿真性能比较如图 2、图 3 所示。

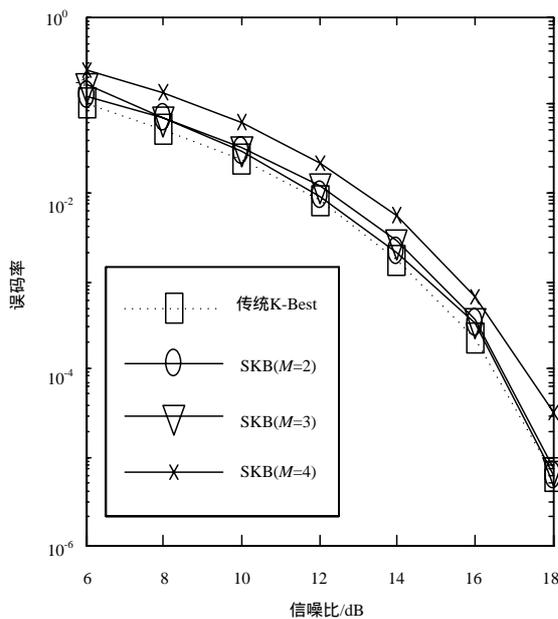


图 2 QPSK 调制下 SKB 与 K-Best 性能比较

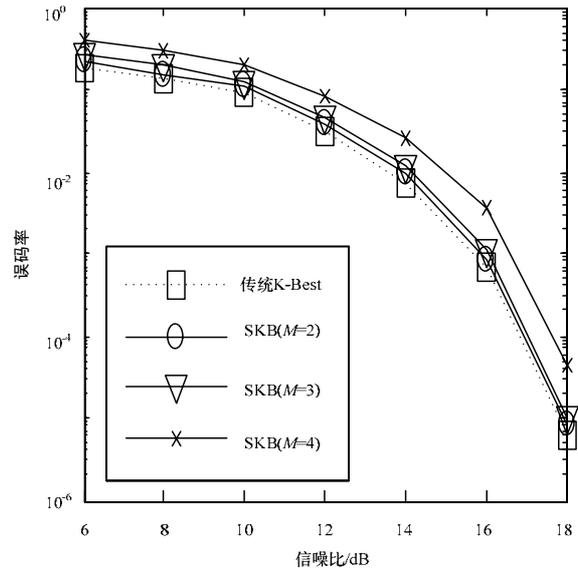


图 3 16-QAM 调制下 SKB 与 K-Best 性能比较

根据仿真结果，在 QPSK 调制及 16-QAM 调制下，SKB($M=2, M=3$)与 K-Best 误码率接近，当 $M=4$ 时，SKB 出现较大性能下降，表明 $M=3$ 的 SKB 算法具有与传统 K-Best 算法相近的次优最大似然性能。

因此，本文在硬件实现中选择 $M=3$ 作为 SKB 算法临界层参数。

2 SKB MIMO 信号检测器硬件结构

2.1 整体结构

本文所设计的 4×4 天线数目、基于 QPSK/16-QAM 可配置调制方式 SKB-MIMO 信号检测器($K=6, M=3$)全并行结构如图 4 所示。

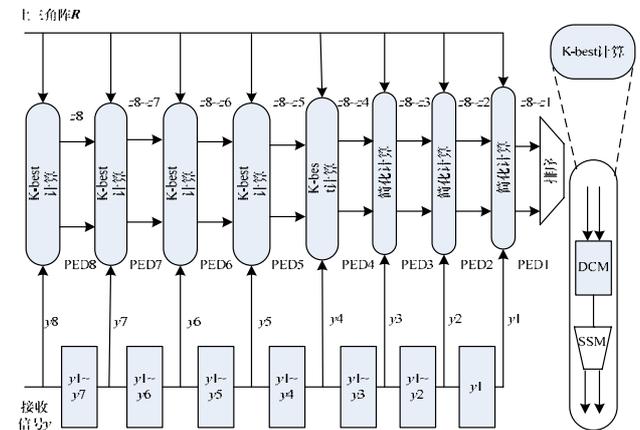


图 4 4×4 天线 QPSK/16-QAM 可配置 SKB MIMO 信号检测系统

检测器由 5 层 K-Best 模块、3 层简化模块与最终排序单元组成，可实现全并行 MIMO 信号检测。其中，K-Best 检测模块包括欧氏距离计算单元(DCM)用以计算当层节点欧氏距离、排序单元(SSM)用以排序选出 K 个节点；迫零模块仅需计算当层节点欧氏距离，无需排序单元。

2.2 可配置型硬件结构

针对 QPSK 与 16-QAM 2 种调制方式进行解调的可重构 MIMO 信号检测器 K-Best 层 DCM 结构如图 5 所示，其功能为实现 SKB 算法的式(5)与式(6)。

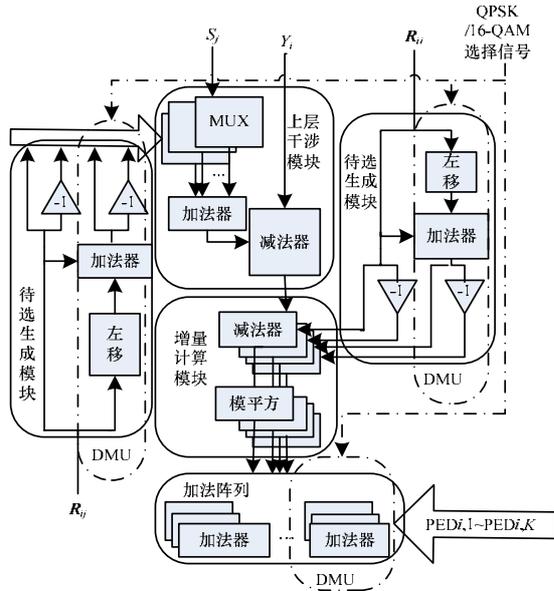


图5 MIMO信号检测器K-Best层DCM可配置结构

为减少硬件资源消耗，式(5)的 $R_i z'_i$ 与 $R_j z'_j$ 采用移位、加法器与选择器(MUX)实现。在16-QAM调制方式下，经过实数化分解后， $z' \in \{-3, -1, +1, +3\}$ ，因此，在硬件结构中，先由待选生成模块事先生成集合 $\{-3 \times R, -1 \times R, 1 \times R, 3 \times R\}$ ，将 z' 作为选择器控制端以选择 $R \cdot z'$ 的值。再计算本层各星座点欧氏距离增量。最后经过加法阵列得到本层24个节点欧氏距离后，由后续排序单元SSM选出最小的 $K=6$ 个欧氏距离与其相应节点。

而在QPSK调制模式下，经过实数化分解后， $z' \in \{-1, +1\}$ ，即 $R \cdot z' \in \{-1 \times R, +1 \times R\}$ 。由此，待选生成模块只需生成2个待选数据。同样，只需12个加法器即可计算本层所有节点欧氏距离。因此，在设计中采用休眠模式单元DMU，使电路能针对QPSK模式进行解调。从图5可以看出，QPSK/16-QAM选择信号控制DMU，以决定DCM模块工作模式。在QPSK调制方式下QPSK/16-QAM选择信号有效，DMU关闭待选生成模块中 $\pm 3 \times R$ 计算单元、上层干涉模块与增量计算模块中 $\pm 3 \times R$ 关联计算单元以及加法阵列中12个加法器，使系统工作于全并行QPSK模式中。

3 结果分析

3.1 FPGA实现结果

SKB-MIMO信号检测器由Xilinx Virtex-4 FPGA (XC4VLX200) FPGA实现。表1列举了此MIMO信号检测器各项性能指标，其中，触发器及4输入查找表的2个数值分别为实际使用个数及占用率。

XC4VLX200平台	性能指标
触发器	14 456(9%)
4输入查找表	25 414(14%)
时钟频率/MHz	130
数据吞吐量/(Gb·s ⁻¹)	2.0(16QAM) 1.0(QPSK)

电路采用全并行方式实现，因此，数据吞吐率为 $f \times \min(M_R, M_T) \times L_C$ ，其中， f 为时钟频率； M_R, M_T 分别为输入端天线数与输出端天线数； L_C 为不同调制方式下星座点映射二进制序列长度(QPSK为2，16-QAM为4)。通过测试表明，SKB-MIMO信号检测器在16-QAM调制与QPSK调制时数据吞吐率分别可达到2 Gb/s与1 Gb/s。

3.2 同类设计比较

表2列举了本设计与一些典型MIMO信号检测器性能的比较结果，其中，一个等效门(GE)相当于一个二输入与非门；Xilinx FPGA4输入查找表(LUT)相当于1~9个等效门，通常以6个等效门进行计算，虽然采用FPGA而非ASIC实现，但是SKB-MIMO信号检测器速率仍超过天线与调制方式类型相同的文献[3]中的SD算法检测器以及文献[1,4]中的K-Best算法检测器。同时，该SKB-MIMO信号检测器也在各设计中达到最高的数据率-硬件资源比，表明通过SKB算法与硬件结构简化，本设计有效地优化了硬件资源的利用。

表2 各MIMO信号检测器性能比较

相关性能	检测器				
	SD1 ^[2]	SD2 ^[3]	K-Best ^[1]	K-Best ^[4]	本例SKB
天线数目	4×4				4×4
调制方式	16-QAM				16-QAM/QPSK
时钟频率/MHz	51	73	132	150	130
数据吞吐量/(Mb·s ⁻¹)	71	169	424	600	2 000(16-QAM)/ 1 000(QPSK)
硬件资源/千门	117 (GE)	50 (GE)	93 (GE)	16(LUT)/ 96(GE)	25(LUT)/ 150(GE)
数据吞吐量与硬件资源之比	0.61	3.38	4.56	6.25	13.33(16-QAM)/ 6.67(QPSK)
实现平台	ASIC	ASIC	ASIC	FPGA	FPGA

4 结束语

本文提出一种4×4天线系统MIMO信号检测器的SKB算法及其可配置功能硬件的实现方法。SKB算法减少了计算复杂度，降低了硬件资源消耗。QPSK/16-QAM可重构硬件实现使MIMO信号检测器能够适用于不同调制方式，增大了检测器的应用范围。在今后的研究中，通过SKB算法大幅减少硬件消耗的特性，可使64-QAM等计算复杂度较高的调制方式也能够由MIMO信号检测器进行可配置解调。

参考文献

- [1] Wenk M, Zellweger M. K-Best MIMO Detecting VLSI Architectures Achieving up to 424Mbps[C]//Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Circuits and Systems. [S. l.]: IEEE Press, 2006.
- [2] Zhao Wanlun, Giarmakis G B. Reduced Complexity Closest Point Decoding Algorithms for Random Lattices[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(1): 101-111.
- [3] Burg A, Borgmann M, Wenk M, et al. VLSI Implementation of MIMO Detection Using the Sphere Decoding Algorithm[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(7): 1566-1577.
- [4] Barbero L G. Rapid Prototyping of a Fixed-throughput Sphere Decoder for MIMO Systems[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Communications. [S. l.]: IEEE Press, 2006.

编辑 陈文