



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116346552 B

(45) 授权公告日 2025. 05. 16

(21) 申请号 202310147670.5

(56) 对比文件

(22) 申请日 2023.02.21

WO 2013084367 A1, 2013.06.13

CN 107566307 A, 2018.01.09

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 116346552 A

审查员 饶锐

(43) 申请公布日 2023.06.27

(73) 专利权人 西安宇画智测通信科技有限公司

地址 710000 陕西省西安市曲江新区雁翔

路3269号旺座曲江G座19层E-05

(72) 发明人 宫丰奎 韩家豪 张沛鑫

(74) 专利代理机构 西安嘉思特知识产权代理事

务所(普通合伙) 61230

专利代理师 李薇

(51) Int. Cl.

H04L 25/03 (2006.01)

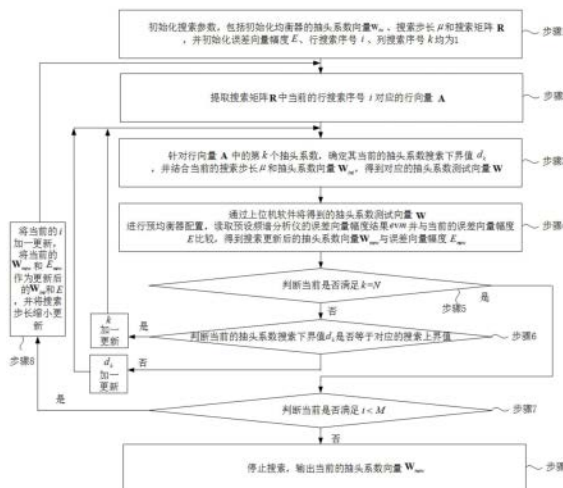
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,应用于通信系统发射端的均衡器中,包括:初始化搜索参数;根据搜索矩阵当前行搜索序号得到各抽头系数的搜索范围;在对应行内顺序遍历各位置,针对任一位置,更新其在搜索范围内的抽头系数值并将该值通过上位机软件进行配置,通过读取预设频谱分析仪的误差向量幅度结果对该位置的抽头系数进行迭代搜索,在完成后进行行内下一位置的搜索;在完成行内全部抽头系数的搜索后进行下一行,直至满足EVM指标要求或搜索矩阵遍历完成后停止,得到最终的抽头系数值。本发明实现复杂度较低,可在较短时间内完成预均衡系数搜索,配置后可对由群时延和失真等造成的发射端EVM性能降低作有效补偿。



1. 一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,应用于通信系统发射端的均衡器中,包括:

步骤1,初始化搜索参数,包括初始化均衡器的抽头系数向量 W_{ini} 、搜索步长 μ 和搜索矩阵 R ,并初始化误差向量幅度 E 、行搜索序号 i 、列搜索序号 k 均为1;其中,抽头系数向量 W_{ini} 中的 N 个元素用于表示 T 个复数均衡器系数, $N=2T$;所述搜索矩阵 R 的维度为 $M \times N$,其内元素表示对应位置的抽头系数的搜索上界值; M 表示最大搜索次数;

步骤2,提取所述搜索矩阵 R 中当前的行搜索序号 i 对应的行向量 A ;

步骤3,针对行向量 A 中的第 k 个抽头系数,确定其当前的抽头系数搜索下界值 d_k ,并结合当前的搜索步长 μ 和抽头系数向量 W_{ini} ,得到对应的抽头系数测试向量 W ;

步骤4,通过上位机软件将得到的抽头系数测试向量 W 进行均衡器配置,读取预设频谱分析仪的误差向量幅度结果 evm 并与当前的误差向量幅度 E 比较,得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ;其中,所述预设频谱分析仪具有EVM分析功能;

步骤5,判断当前是否满足 $k=N$;若否,执行步骤6,若是,执行步骤7;

步骤6,判断当前的抽头系数搜索下界值 d_k 是否等于对应的搜索上界值;若等于,将当前的 k 加一更新后返回步骤3,若不等于,将当前的 d_k 进行加一更新后返回步骤3;

步骤7,判断当前是否满足 $i < M$;若满足,执行步骤8,若不满足,执行步骤9;

步骤8,将当前的 i 加一更新,将当前的 W_{new} 和 E_{new} 作为更新后的抽头系数向量 W_{ini} 和误差向量幅度 E ,并将搜索步长缩小更新,返回步骤2;

步骤9,停止搜索,输出当前的抽头系数向量 W_{new} 。

2. 根据权利要求1所述的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,初始化均衡器的抽头系数向量 W_{ini} 的过程中所采用的公式包括:

$$w_n = \begin{cases} 0, & n \neq \frac{N}{2} \\ 1, & n = \frac{N}{2} \end{cases}; n=1, 2, \dots, N$$

其中, w_n 表示所述抽头系数向量 W_{ini} 中的第 n 个元素, N 表示元素总数, n 和 N 为大于0的自然数。

3. 根据权利要求1所述的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,所述 T 个复数均衡器系数为 $c_1, c_2, \dots, c_t, \dots, c_T$;其中,

$$c_t = w_{2t-1} + j \cdot w_{2t}, t=1, 2, \dots, T$$

w_{2t-1} 表示所述抽头系数向量 W_{ini} 中奇数位置对应的元素; w_{2t} 表示所述抽头系数向量 W_{ini} 中偶数位置对应的元素; j 表示虚数单位; T 为大于0的自然数。

4. 根据权利要求1所述的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,在步骤3中,针对行向量 A 中的第 k 个抽头系数,在首次迭代时,其当前的抽头系数搜索下界值 d_k 为所述行向量 A 中对应位置的抽头系数的搜索上界值的负值。

5. 根据权利要求4所述的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,所述结合当前的搜索步长 μ 和抽头系数向量 W_{ini} ,得到对应的抽头系数测试向量 W ,包括:

利用抽头系数测试向量计算公式确定对应的抽头系数测试向量 W ,其中,所述抽头系数测试向量计算公式包括: $W = W_{ini} + d_k \cdot \mu$ 。

6. 根据权利要求5所述的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,所述通过上位机软件将得到的抽头系数测试向量W进行均衡器配置,包括:

利用上位机软件将得到的抽头系数测试向量W发送给FPGA;

所述FPGA利用接收到的抽头系数测试向量W配置所述均衡器。

7. 根据权利要求6所述的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,所述读取预设频谱分析仪的误差向量幅度结果evm并与当前的误差向量幅度E比较,得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ,包括:

将配置完成的均衡器针对其输入信号所得到的输出信号发送给预设频谱分析仪;其中,所述输入信号是待均衡的调制器输出的数字信号;

读取所述预设频谱分析仪的测试结果,得到误差向量幅度结果evm;

比较所述误差向量幅度结果evm与当前的误差向量幅度E,根据较小值对应的结果得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} 。

8. 根据权利要求7所述的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,所述比较所述误差向量幅度结果evm与当前的误差向量幅度E,根据较小值对应的结果得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ,包括:

利用预设比较公式确定搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ;其中,所述预设比较公式包括:

$$E_{new} = \begin{cases} evm, & evm < E \\ E, & evm \geq E \end{cases};$$

$$W_{new} = \begin{cases} W, & evm < E \\ W_{mi}, & evm \geq E \end{cases}.$$

9. 根据权利要求1所述的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,所述将搜索步长缩小更新,包括:

将搜索步长缩小更新为当前搜索步长的一半。

10. 根据权利要求1至9任一项所述的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,其特征在于,针对所述基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,将搜索矩阵R进行遍历搜索所需的总搜索次数的计算公式为:

$$f = \sum_{i=1}^M \left(\prod_{n=1}^N (2r_{i,n} + 1) \right)$$

其中, $r_{i,n}$ 表示所述搜索矩阵R中第i行第n列的元素; $\Sigma(\cdot)$ 表示求和; $\Pi(\cdot)$ 表示求乘积。

一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法

技术领域

[0001] 本发明属于数字卫星通信技术领域,具体涉及一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法。

背景技术

[0002] 随着数字卫星通信技术的发展,数字信号的高速率、大带宽对通信系统的发射端和接收端提出了更高的要求。然而,大带宽信号经过通信信道后会产生群时延的失真现象,且由于功放的非线性特性还可能会产生非线性失真的现象,严重恶化发射端误差向量幅度(Error Vector Magnitude,EVM)性能。通过在发射端的数字域增加预均衡滤波器来抵消通信信道群时延失真带来的影响,是一种常用的EVM提升方法。典型的预均衡方法有静态预均衡和动态预均衡,对于动态预均衡,需要发射端具备实时接收采样反馈数据的功能,进而大幅提升发射端数字域的处理复杂度,造成信号发生器的成本过大;而对于静态预均衡,通过线下计算的方法得到预均衡系数,但该方法需要额外的高速采集数据的设备,另外还需要设计对应的信号接收机来计算均衡系数。高速采集数据设备可以是专用的信号采集仪,也可以是具备采集高速数据功能的频谱分析仪,但在缺少高速采集设备的情况下,该方法无法使用。

[0003] 作为静态预均衡方法的一种,曾德军于2022年在《通信技术》期刊上所发表的《基于新型并行LMS算法的数字预失真器设计》一文中,提出了用于数字预失真器中的最小均方自适应结构,能够提高功放的线性度,补偿信号经过功放后产生的非线性失真。该方法优化了自适应滤波器的结构,简化了FPGA端实现数字预失真器的复杂度。但是,若要将该方法应用于发射端,首先需要采集经过通信信道和功放的信号数据,并将其反馈给发射端通过最小均方预失真模型进行计算,得到预失真滤波器系数后对信号的EVM性能进行补偿。因此该方法需要一台能够采集高速数据并将其反馈给FPGA端的设备,缺少采集数据的设备则该方法无法使用。

[0004] 因此,如何降低现有静态预均衡方法的实现复杂度、降低预均衡系数的搜索时间,以便于快速简便地补偿群时延和失真等对发射端造成的性能恶化,是本领域内一个亟待解决的问题。

发明内容

[0005] 为了解决现有技术中存在的上述问题,本发明提供了一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法和装置。本发明要解决的技术问题通过以下技术方案实现:

[0006] 第一方面,本发明实施例提供了一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,应用于通信系统发射端的均衡器中,所述方法包括:

[0007] 步骤1,初始化搜索参数,包括初始化均衡器的抽头系数向量 W_{ini} 、搜索步长 μ 和搜索矩阵 R ,并初始化误差向量幅度 E 、行搜索序号 i 、列搜索序号 k 均为1;其中,抽头系数向量 W_{ini} 中的 N 个元素用于表示 T 个复数均衡器系数, $N=2T$;所述搜索矩阵 R 的维度为 $M \times N$,其内

元素表示对应位置的抽头系数的搜索上界值;M表示最大搜索次数;

[0008] 步骤2,提取所述搜索矩阵R中当前的行搜索序号i对应的行向量A;

[0009] 步骤3,针对行向量A中的第k个抽头系数,确定其当前的抽头系数搜索下界值 d_k ,并结合当前的搜索步长 μ 和抽头系数向量 W_{ini} ,得到对应的抽头系数测试向量W;

[0010] 步骤4,通过上位机软件将得到的抽头系数测试向量W进行均衡器配置,读取预设频谱分析仪的误差向量幅度结果evm并与当前的误差向量幅度E比较,得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ;其中,所述预设频谱分析仪具有EVM分析功能;

[0011] 步骤5,判断当前是否满足 $k=N$;若否,执行步骤6,若是,执行步骤7;

[0012] 步骤6,判断当前的抽头系数搜索下界值 d_k 是否等于对应的搜索上界值;若等于,将当前的k加一更新后返回步骤3,若不等于,将当前的 d_k 进行加一更新后返回步骤3;

[0013] 步骤7,判断当前是否满足 $i < M$;若满足,执行步骤8,若不满足,执行步骤9;

[0014] 步骤8,将当前的i加一更新,将当前的 W_{new} 和 E_{new} 作为更新后的抽头系数向量 W_{ini} 和误差向量幅度E,并将搜索步长缩小更新,返回步骤2;

[0015] 步骤9,停止搜索,输出当前的抽头系数向量 W_{new} 。

[0016] 在本发明的一个实施例中,初始化均衡器的抽头系数向量 W_{ini} 的过程中所采用的公式包括:

$$[0017] \quad w_n = \begin{cases} 0, & n \neq \frac{N}{2} \\ 1, & n = \frac{N}{2} \end{cases}; n = 1, 2, \dots, N$$

[0018] 其中, w_n 表示所述抽头系数向量 W_{ini} 中的第n个元素,N表示元素总数,n和N为大于0的自然数。

[0019] 在本发明的一个实施例中,所述T个复数均衡器系数为 $c_1, c_2, \dots, c_t, \dots, c_T$;其中,

$$[0020] \quad c_t = w_{2t-1} + j \cdot w_{2t}, t = 1, 2, \dots, T$$

[0021] w_{2t-1} 表示所述抽头系数向量 W_{ini} 中奇数位置对应的元素; w_{2t} 表示所述抽头系数向量 W_{ini} 中偶数位置对应的元素;j表示虚数单位;T为大于0的自然数。

[0022] 在本发明的一个实施例中,在步骤3中,针对行向量A中的第k个抽头系数,在首次迭代时,其当前的抽头系数搜索下界值 d_k 为所述行向量A中对应位置的抽头系数的搜索上界值的负值。

[0023] 在本发明的一个实施例中,所述结合当前的搜索步长 μ 和抽头系数向量 W_{ini} ,得到对应的抽头系数测试向量W,包括:

[0024] 利用抽头系数测试向量计算公式确定对应的抽头系数测试向量W,其中,所述抽头系数测试向量计算公式包括: $W = W_{ini} + d_k \cdot \mu$ 。

[0025] 在本发明的一个实施例中,所述通过上位机软件将得到的抽头系数测试向量W进行均衡器配置,包括:

[0026] 利用上位机软件将得到的抽头系数测试向量W发送给FPGA;

[0027] 所述FPGA利用接收到的抽头系数测试向量W配置所述均衡器。

[0028] 在本发明的一个实施例中,所述读取预设频谱分析仪的误差向量幅度结果evm并与当前的误差向量幅度E比较,得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ,包

括：

[0029] 将配置完成的均衡器针对其输入信号所得到的输出信号发送给预设频谱分析仪；其中，所述输入信号是待均衡的调制器输出的数字信号；

[0030] 读取所述预设频谱分析仪的测试结果，得到误差向量幅度结果 evm ；

[0031] 比较所述误差向量幅度结果 evm 与当前的误差向量幅度 E ，根据较小值对应的结果得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} 。

[0032] 在本发明的一个实施例中，所述比较所述误差向量幅度结果 evm 与当前的误差向量幅度 E ，根据较小值对应的结果得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ，包括：

[0033] 利用预设比较公式确定搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ；其中，所述预设比较公式包括：

$$[0034] \quad E_{new} = \begin{cases} evm, & evm < E \\ E, & evm \geq E \end{cases};$$

$$[0035] \quad W_{new} = \begin{cases} W, & evm < E \\ W_{ini}, & evm \geq E \end{cases}.$$

[0036] 在本发明的一个实施例中，所述将搜索步长缩小更新，包括：

[0037] 将搜索步长缩小更新为当前搜索步长的一半。

[0038] 在本发明的一个实施例中，针对所述基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法，将搜索矩阵 R 进行遍历搜索所需的总搜索次数的计算公式为：

$$[0039] \quad f = \sum_{i=1}^M \left(\prod_{n=1}^N (2r_{i,n} + 1) \right)$$

[0040] 其中， $r_{i,n}$ 表示所述搜索矩阵 R 中第 i 行第 n 列的元素； $\Sigma(\cdot)$ 表示求和； $\Pi(\cdot)$ 表示求乘积。

[0041] 本发明的有益效果：

[0042] 本发明实施例设计了一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法，通过设计扫描矩阵对用于均衡器的预均衡系数进行在线搜索，能够大幅降低搜索次数。该方法仅需要一台具有EVM分析功能的频谱仪，借助上位机软件即可完成预均衡系数的设置。本发明实施例的实现复杂度较低，可以在较短的时间内完成预均衡系数的搜索，通过对搜索得到的预均衡系数进行预均衡器配置，能够改善宽带信号的误差向量幅度，补偿群时延和失真等对发射端造成的性能恶化进行补偿。

附图说明

[0043] 图1为本发明实施例所提供的一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法的流程示意图；

[0044] 图2为本发明实施例所提供的基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法的另一种流程示意图。

具体实施方式

[0045] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0046] 如图1所示,本发明实施例所提供的一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,应用于通信系统发射端的均衡器中,可以包括如下步骤:

[0047] 步骤1,初始化搜索参数,包括初始化均衡器的抽头系数向量 W_{ini} 、搜索步长 μ 和搜索矩阵 R ,并初始化误差向量幅度 E 、行搜索序号 i 、列搜索序号 k 均为1;

[0048] 具体的,本发明实施例的搜索参数包括抽头系数向量 W_{ini} 、搜索步长 μ 、搜索矩阵 R 、误差向量幅度 E 、行搜索序号 i 和列搜索序号 k 。

[0049] 其中,抽头系数向量 W_{ini} 中的 N 个元素 $[w_1, w_2, \dots, w_n, \dots, w_{N-1}, w_N]$ 用于表示 T 个复数均衡器系数,即表示预均衡复数系数的实部与虚部数值;其中,所述 T 个复数均衡器系数为 $c_1, c_2, \dots, c_t, \dots, c_T$; $N=2T$, N 和 T 为大于0的自然数。

[0050] 可选的一种实施方式中,可以用抽头系数向量 W_{ini} 中奇数位置的数值表示复数均衡器系数的实部数值,用抽头系数向量 W_{ini} 中偶数位置的数值表示复数均衡器系数的虚部数值,或者反之亦可。

[0051] 比如,针对其中第一种情况,各复数均衡器系数具体表示为:

$$[0052] \quad c_t = w_{2t-1} + j \cdot w_{2t}, t = 1, 2, \dots, T$$

[0053] 其中, w_{2t-1} 表示所述抽头系数向量 W_{ini} 中奇数位置对应的元素; w_{2t} 表示所述抽头系数向量 W_{ini} 中偶数位置对应的元素; j 表示虚数单位。

[0054] 初始化均衡器的抽头系数向量 W_{ini} 时,为了减少计算量,可选的一种实施方式中,可以将 W_{ini} 的 N 个元素中的任一个设置为1,其余设置为0。比如可以将任一奇数位置对应的元素设置为1,其余设置为0。

[0055] 可选的一种实施方式中,初始化均衡器的抽头系数向量 W_{ini} 的过程中所采用的公式包括:

$$[0056] \quad w_n = \begin{cases} 0, & n \neq \frac{N}{2} \\ 1, & n = \frac{N}{2} \end{cases}; n = 1, 2, \dots, N$$

[0057] 其中, w_n 表示所述抽头系数向量 W_{ini} 中的第 n 个元素, N 表示元素总数, n 和 N 为大于0的自然数。

[0058] 该种实施方式是将 W_{ini} 的元素中心位置设置为1,其余设置为0。由通信系统中的均衡器特性可知,收敛后的均衡器抽头系数中心位置处系数值较大且接近1,因此初始化时将中心位置设置为1可减小搜索次数。

[0059] 搜索步长 μ 表示搜索矩阵 R 中对抽头系数值进行相邻两次搜索的步进值,其取值范围为 $(0, 1)$,搜索步长 μ 的初始值可以在其取值范围内根据需要合理设定,比如可选的一种实施方式中,搜索步长 μ 的初始值可以为 $1/8$ 等。

[0060] 搜索矩阵 R 根据经验值设定,具体的,由均衡器特性可知,均衡器抽头系数的中心

位置及相邻1至2个抽头系数为关键系数,需要进行多次搜索,且搜索矩阵中相应位置的元素值较大。例如对于有9个抽头系数的均衡器而言,其中心位置及附近1至2个抽头系数为关键系数,因此仅需要进行3至5个抽头系数值的搜索即可,且搜索矩阵元素值可逐行递增,以达到减少搜索次数的目的。所述搜索矩阵R的维度为 $M \times N$,搜索矩阵R可以表示为:

$$[0061] \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{R}_m \\ \vdots \\ \mathbf{R}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,N} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m,1} & r_{m,2} & \cdots & r_{m,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{M,1} & r_{M,2} & \cdots & r_{M,N} \end{bmatrix}$$

[0062] 其中, $r_{m,n}$ 表示搜索矩阵R中第m行第n列的元素, $m=1,2,\dots,M,n=1,2,\dots,N$,且 $r_{m,n} \in \mathbb{N}$,表示搜索矩阵R中的每个元素均为自然数;所述搜索矩阵R内元素表示对应位置的抽头系数的搜索上界值;M表示最大搜索次数,可以根据需要合理设定。

[0063] 误差向量幅度E表示发射机对信号进行解调时产生的实虚部分量与理想信号分量的接近程度,误差向量幅度范围为 $[0,1]$,其初始值可以设置为1,即以最大值1进行初始化来搜索。

[0064] 行搜索序号i表示当前正在搜索矩阵的第i行,列搜索序号k表示正在搜索矩阵R的某一行中第k个抽头系数的位置。为了便于遍历,本发明实施例中将行搜索序号i和列搜索序号k的初始值均设置为1,即从搜索矩阵R的第一行第一列对应的位置开始搜索。

[0065] 步骤2,提取所述搜索矩阵R中当前的行搜索序号i对应的行向量A;

[0066] 具体的,根据当前的行搜索序号i将搜索矩阵R的第i行抽头系数的搜索上界值提取出来,得到:

$$[0067] \quad A = R_i = [a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n}, \dots, a_{i,N}]$$

[0068] 其中, $a_{i,n} = r_{i,n}, n=1,2,\dots,N$ 。

[0069] 可以理解的是,第一次执行步骤2时,提取的行向量A为搜索矩阵R中的第一行。

[0070] 步骤3,针对行向量A中的第k个抽头系数,确定其当前的抽头系数搜索下界值 d_k ,并结合当前的搜索步长 μ 和抽头系数向量 W_{ini} ,得到对应的抽头系数测试向量W;

[0071] 其中,在步骤3中,针对所述行向量A中的第k个抽头系数,在首次迭代时,其当前的抽头系数搜索下界值 d_k 为所述行向量A中对应位置的抽头系数的搜索上界值的负值。也就是说,针对所述行向量A中的第k个抽头系数开始迭代搜索时,根据该抽头系数的列搜索序号k确定 $d_k = -a_{i,k}$,作为其搜索下界值的初始值。

[0072] 可选的一种实施方式中,在确定所述行向量A中的第k个抽头系数当前的抽头系数搜索下界值 d_k 后,所述结合当前的搜索步长 μ 和抽头系数向量 W_{ini} ,得到对应的抽头系数测试向量W,包括:

[0073] 利用抽头系数测试向量计算公式确定对应的抽头系数测试向量W,其中,所述抽头系数测试向量计算公式包括: $W = W_{ini} + d_k \cdot \mu$ 。

[0074] 当然,所述抽头系数测试向量计算公式不限于以上所示。

[0075] 本发明实施例中,得到的抽头系数测试向量W代表搜索到的新的抽头系数向量,作

用是进行均衡器配置和相关测试后确定新的抽头系数向量和误差向量幅度。

[0076] 可以理解的是,第一次执行步骤3时,第k个抽头系数为搜索矩阵R中的第一行第一列对应的抽头系数。

[0077] 步骤4,通过上位机软件将得到的抽头系数测试向量W进行均衡器配置,读取预设频谱分析仪的误差向量幅度结果evm并与当前的误差向量幅度E比较,得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ;

[0078] 其中,所述预设频谱分析仪具有EVM分析功能,可以采用现有的任一种据该功能的频谱分析仪实现。

[0079] 其中,所述通过上位机软件将得到的抽头系数测试向量W进行均衡器配置,包括:

[0080] 利用上位机软件将得到的抽头系数测试向量W发送给FPGA;

[0081] 所述FPGA利用接收到的抽头系数测试向量W配置所述均衡器。

[0082] 具体的配置过程可以参见相关技术理解,在此不做具体说明。

[0083] 其中,所述读取预设频谱分析仪的误差向量幅度结果evm并与当前的误差向量幅度E比较,得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ,包括:

[0084] (1) 将配置完成的均衡器针对其输入信号所得到的输出信号发送给预设频谱分析仪;

[0085] 其中,所述输入信号是待均衡的调制器输出的数字信号。

[0086] (2) 读取所述预设频谱分析仪的测试结果,得到误差向量幅度结果evm;

[0087] 其中,预设频谱分析仪得到误差向量幅度结果evm的具体过程请参见相关技术理解。

[0088] (3) 比较所述误差向量幅度结果evm与当前的误差向量幅度E,根据较小值对应的结果得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} 。

[0089] 该步骤包括:

[0090] 利用预设比较公式确定搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ;其中,所述预设比较公式包括:

$$[0091] \quad E_{new} = \begin{cases} evm, & evm < E \\ E, & evm \geq E \end{cases};$$

$$[0092] \quad W_{new} = \begin{cases} W, & evm < E \\ W_{ini}, & evm \geq E \end{cases}。$$

[0093] 可见,针对 E_{new} ,是在evm和E中选取较小值,而针对 W_{new} ,是在evm和E中选取较小值对应的抽头系数相关向量。本发明实施例通过筛选evm和E下降的搜索方向,来达到对发射端失真后的数字信号进行补偿,并减小其EVM值的目的。

[0094] 可以理解的是,针对所述行向量A中的第k个抽头系数,通过步骤3~步骤4可以得到对应的 E_{new} 和 W_{new} 。

[0095] 步骤5,判断当前是否满足 $k=N$;若否,执行步骤6,若是,执行步骤7;

[0096] 如果满足 $k=N$ 则说明所述行向量A中所有抽头系数已经搜索完成,则需要执行步骤7尝试下一行搜索。

[0097] 如果不满足 $k=N$ 则说明所述行向量A中还有抽头系数未搜索完成,则执行步骤6继

续在所述行向量A中搜索。

[0098] 步骤6,判断当前的抽头系数搜索下界值 d_k 是否等于对应的搜索上界值;若等于,将当前的 k 加一更新后返回步骤3,若不等于,将当前的 d_k 进行加一更新后返回步骤3;

[0099] 从前文可见,抽头系数搜索下界值 d_k 的初始值为对应的搜索上界值的负值,即针对每个抽头系数的搜索范围为 $[-r_{m,n}, r_{m,n}]$ 。

[0100] 如果当前的抽头系数搜索下界值 d_k 等于对应的搜索上界值,则说明该抽头系数已经在搜索范围内搜索完毕,则需要执行该行内下一个抽头系数的搜索,即 $k+1$ 后返回步骤3继续搜索,可以理解的是,相比之前,返回步骤3后 k 发生变化,其当前的抽头系数搜索下界值 d_k 也发生变化,变为所述行向量A中对应位置的抽头系数的搜索上界值的负值,而行搜索序号 i 、搜索步长 μ 和抽头系数向量 W_{ini} 并未发生变化。

[0101] 如果当前的抽头系数搜索下界值 d_k 不等于对应的搜索上界值,则说明该抽头系数在搜索范围内还未搜索完毕,则需要针对该抽头系数继续搜索,此时 d_k+1 后返回步骤3继续搜索,可以理解的是,相比之前,返回步骤3后 k 未发生变化,行搜索序号 i 、搜索步长 μ 和抽头系数向量 W_{ini} 也未发生变化, d_k 发生了变化。

[0102] 步骤7,判断当前是否满足 $i < M$;若满足,执行步骤8,若不满足,执行步骤9;

[0103] 如果满足 $i < M$,说明搜索矩阵R中的行未搜索完成,还需要对下一行进行搜索,此时,利用已有结果执行步骤8的更新,再返回步骤2进行新一行的搜索。

[0104] 如果不满足 $i < M$,即存在 $i = M$,说明搜索矩阵R中的行搜索完成,则执行步骤9,停止搜索,输出当前搜索结果。

[0105] 步骤8,将当前的 i 加一更新,将当前的 W_{new} 和 E_{new} 作为更新后的抽头系数向量 W_{ini} 和误差向量幅度 E ,并将搜索步长缩小更新,返回步骤2;

[0106] 可选的一种实施方式中,所述将搜索步长缩小更新,包括:

[0107] 将搜索步长缩小更新为当前搜索步长的一半,即将搜索步长设置为 $\frac{\mu}{2}$,也就是采用二分法将搜索步长进行更新。

[0108] 在上述实施方式基础上,步骤8中更新得到的行搜索序号为 $i+1$,更新得到的抽头系数向量 $W_{ini} = W_{new}$,更新得到的误差向量幅度 $E = E_{new}$,更新得到的搜索步长为 $\frac{\mu}{2}$,利用这些更新后的参数返回步骤2,执行 $i+1$ 行的搜索,具体过程请参见前文内容。

[0109] 当然,本发明实施例中,将搜索步长缩小更新的方式不限于设置为 $\frac{\mu}{2}$,其中的 $1/2$ 也可以为 $1/3$ 、 $1/4$ 、 $1/5$ 等介于 $(0, 1)$ 之间的数值。

[0110] 步骤9,停止搜索,输出当前的抽头系数向量 W_{new} 。

[0111] 具体的,当前的抽头系数向量 W_{new} 作为最终搜索到的预均衡系数,可以用于配置均衡器以对发射端性能恶化进行补偿。具体的,均衡器会根据配置的搜索得到的预均衡系数对发射端的数字信号进行均衡滤波,来达到抵消信号中的失真及畸变的目的,同时提高发射端信号的误差向量幅度,补偿被失真恶化的发射性能

[0112] 如前文所述,由于每个抽头系数的搜索范围为 $[-r_{m,n}, r_{m,n}]$, d_k 的变化步进为1,针对所述基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法,将搜索矩阵R进行遍历搜索所需的总搜

索次数的计算公式为：

$$[0113] \quad f = \sum_{i=1}^M \left(\prod_{n=1}^N (2r_{i,n} + 1) \right)$$

[0114] 其中, $r_{i,n}$ 表示所述搜索矩阵R中第i行第n列的元素; $\Sigma(\cdot)$ 表示求和; $\Pi(\cdot)$ 表示求乘积。

[0115] 因此, 在所述搜索矩阵R确定的情况下, 通过上述计算公式可以明确计算出总搜索次数。

[0116] 以下给出一个具体的实施例对本发明方法进行说明, 并请参见图2理解。

[0117] 具体步骤包括:

[0118] (1) 初始化搜索参数:

[0119] 初始化均衡器的抽头系数值为 $W_{ini} = [0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]$, 分别代表 c_1, c_2, c_3, c_4 共4个复数均衡器系数, 其中, 每个复数均衡器系数可以表示为 $c_t = w_{2t-1} + i \cdot w_{2t}$, $t=1, 2, 3, 4$, c_2 为中心抽头系数值, c_1 为前向抽头系数值, c_3 和 c_4 为后向抽头系数值, 初始化的搜索步长为 $\mu = \frac{1}{8}$;

[0120] 搜索矩阵为:

$$[0121] \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \mathbf{R}_3 \\ \mathbf{R}_4 \\ \mathbf{R}_5 \\ \mathbf{R}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

[0122] 误差向量幅度E初始化为 $E=1$; i表示行搜索序号, 表示正在搜索矩阵R的第i行, 初始化为 $i=1$; k表示列搜索序号, 表示正在搜索矩阵R的某一行中第k个抽头系数, 初始化为 $k=1$ 。

[0123] (2) 迭代搜索均衡器系数即抽头系数值, 具体包括以下步骤:

[0124] (2a) 根据搜索矩阵R当前的行搜索序号i, 将搜索矩阵R的第i行抽头系数的搜索上界值取出, 即 $A = R_i = [a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,8}]$, 其中, $a_{i,n} = r_{i,n}$, $n=1, 2, \dots, 8$;

[0125] (2b) 通过搜索上界值对A中的每个抽头系数进行迭代搜索, 具体包括以下步骤:

[0126] (2b1) 根据每个抽头系数的列搜索序号k得到其初始的搜索下界值为 $d_k = -a_{i,k}$;

[0127] (2b2) 通过当前的搜索下界值 d_k 得到表征均衡器抽头系数的抽头系数测试向量W为:

$$[0128] \quad W = W_{ini} + d_k \cdot \mu$$

[0129] (2b3) 利用上位机软件将(2b2)计算得到的抽头系数测试向量W发送给FPGA;

[0130] (2b4) FPGA通过(2b3)中的均衡器抽头系数W配置均衡器, 并将均衡器的输出信号接入预设频谱分析仪进行分析;

[0131] (2b5) 通过预设频谱分析仪观测其误差向量幅度evm, 根据evm对抽头系数测试向量W与误差向量幅度E进行判断, 得到搜索更新后的抽头系数向量 W_{new} 与误差向量幅度 E_{new} ;

$$[0132] \quad E_{new} = \begin{cases} evm, & evm < E \\ E, & evm \geq E \end{cases}$$

$$[0133] \quad \mathbf{W}_{new} = \begin{cases} \mathbf{W}, & evm < E \\ \mathbf{W}_{ini}, & evm \geq E \end{cases}$$

[0134] (2b6) 判断若 $k=N$ 则执行步骤(2c), 否则对 d_k 进行判断: 若 $d_k = a_{i,k}$, 执行步骤(2b7), 否则执行步骤(2b8);

[0135] (2b7) 更新 $k=k+1$, 重复步骤(2b1)至(2b6);

[0136] (2b8) 更新 $d_k = d_k + 1$, 重复步骤(2b2)至(2b6);

[0137] (2c) 判断若 $i < M$ 执行步骤(2c1), 否则执行步骤(2c2):

[0138] (2c1) 更新搜索行数 i 、抽头系数向量 \mathbf{W}_{ini} 、误差向量幅度 E 与搜索步长 μ : 更新 $i = i + 1$ 、 $\mathbf{W}_{ini} = \mathbf{W}_{new}$ 、 $E = E_{new}$ 、 $\mu = \frac{\mu}{2}$, 重复步骤(2a)至(2c);

[0139] (2c2) 停止搜索, 得到均衡器的抽头系数值 \mathbf{W}_{new} 。

[0140] 结合实施例中的搜索矩阵, 本发明实施例第1次以步长 $1/8$ 对搜索矩阵第1行非0元素位置的抽头系数进行搜索, 共需搜索 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 次; 第2次在第1次搜索结果的基础上, 以步长 $1/16$ 对搜索矩阵第2行非0元素位置的抽头系数进行搜索, 共需搜索 $3 \times 5 \times 5 = 75$ 次; 第3次在第2次搜索结果的基础上, 以步长 $1/32$ 对搜索矩阵第3行非0元素位置的抽头系数进行搜索, 共需搜索 $3 \times 3 \times 5 \times 5 = 225$ 次; 第4次在第3次搜索结果的基础上, 以步长 $1/64$ 对搜索矩阵第4行非0元素位置的抽头系数进行搜索, 共需搜索 $3^7 = 2187$ 次; 第5次在第4次搜索结果的基础上, 以步长 $1/128$ 对搜索矩阵第5行非0元素位置的抽头系数进行搜索, 同样需要搜索 $3^7 = 2187$ 次; 最后一次以步长 $1/256$ 对搜索矩阵第6行非0元素位置的抽头系数进行搜索, 需要搜索 $3^8 = 6561$ 次。经过多次实测证明: 利用上述搜索矩阵, 经过前三次搜索, 一般可以将EVM降低到5%以内, 经过前5次搜索, 可以降低到3.5%, 经过最后一次搜索则可以将EVM降低到3.2%。也就是说, 仅需要 $27+75+225 = 327$ 次搜索, 就可以达到满足要求的EVM性能。假设每次搜索需要100ms, 则33s以内即可完成基本搜索, 大幅降低搜索次数, 缩短搜索预均衡系数所需的时间。

[0141] 本发明实施例设计了一种基于扫描矩阵的预均衡系数快速搜索方法, 通过设计扫描矩阵对用于均衡器的预均衡系数进行在线搜索, 能够大幅降低搜索次数。该方法仅需要一台具有EVM分析功能的频谱仪, 借助上位机软件即可完成预均衡系数的设置。本发明实施例的实现复杂度较低, 可以在较短的时间内完成预均衡系数的搜索, 通过对搜索得到的预均衡系数进行预均衡器配置, 能够改善宽带信号的误差向量幅度, 补偿群时延和失真等对发射端造成的性能恶化进行补偿。

[0142] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已, 并非用于限定本发明的保护范围。凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换、改进等, 均包含在本发明的保护范围内。

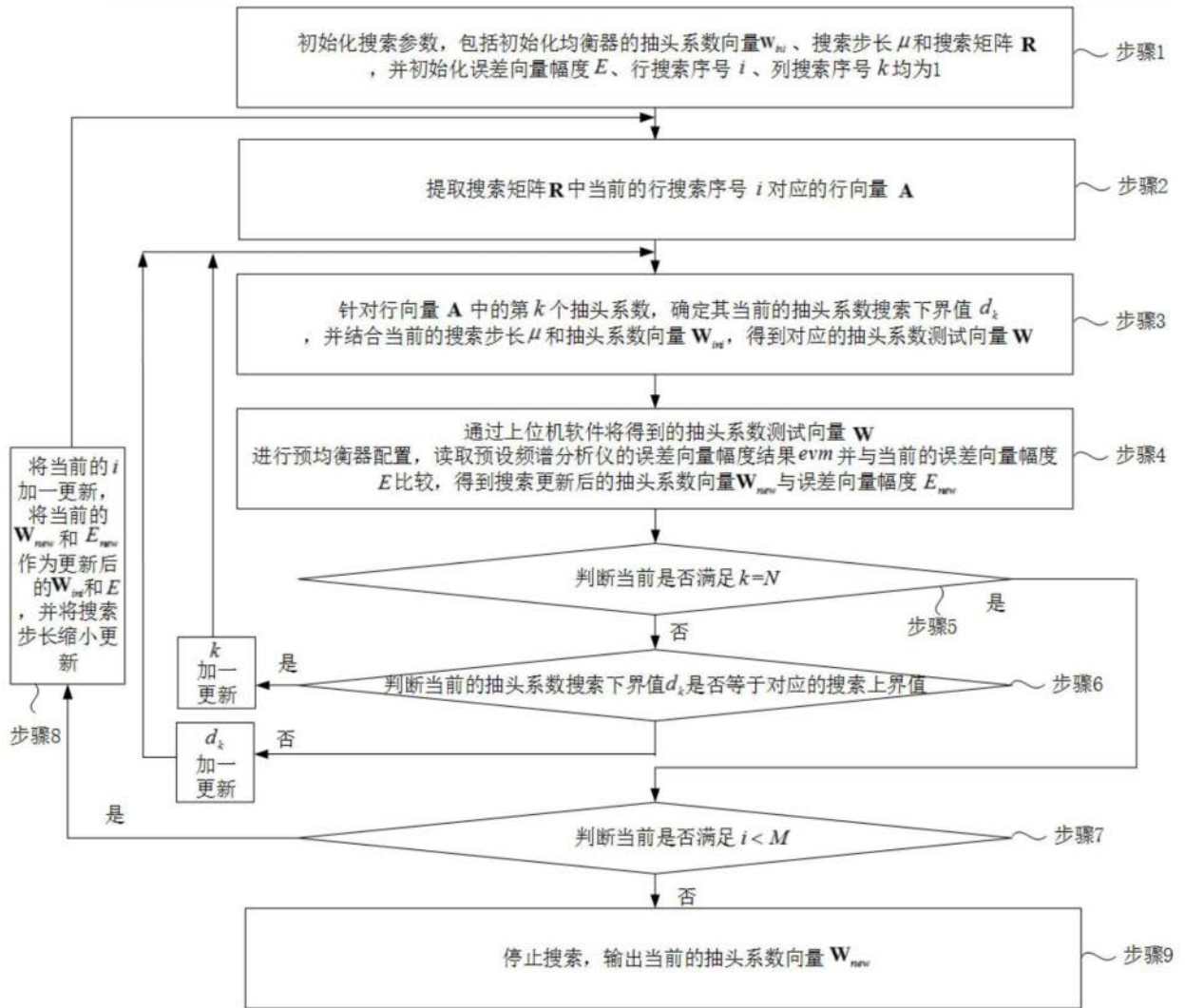


图1

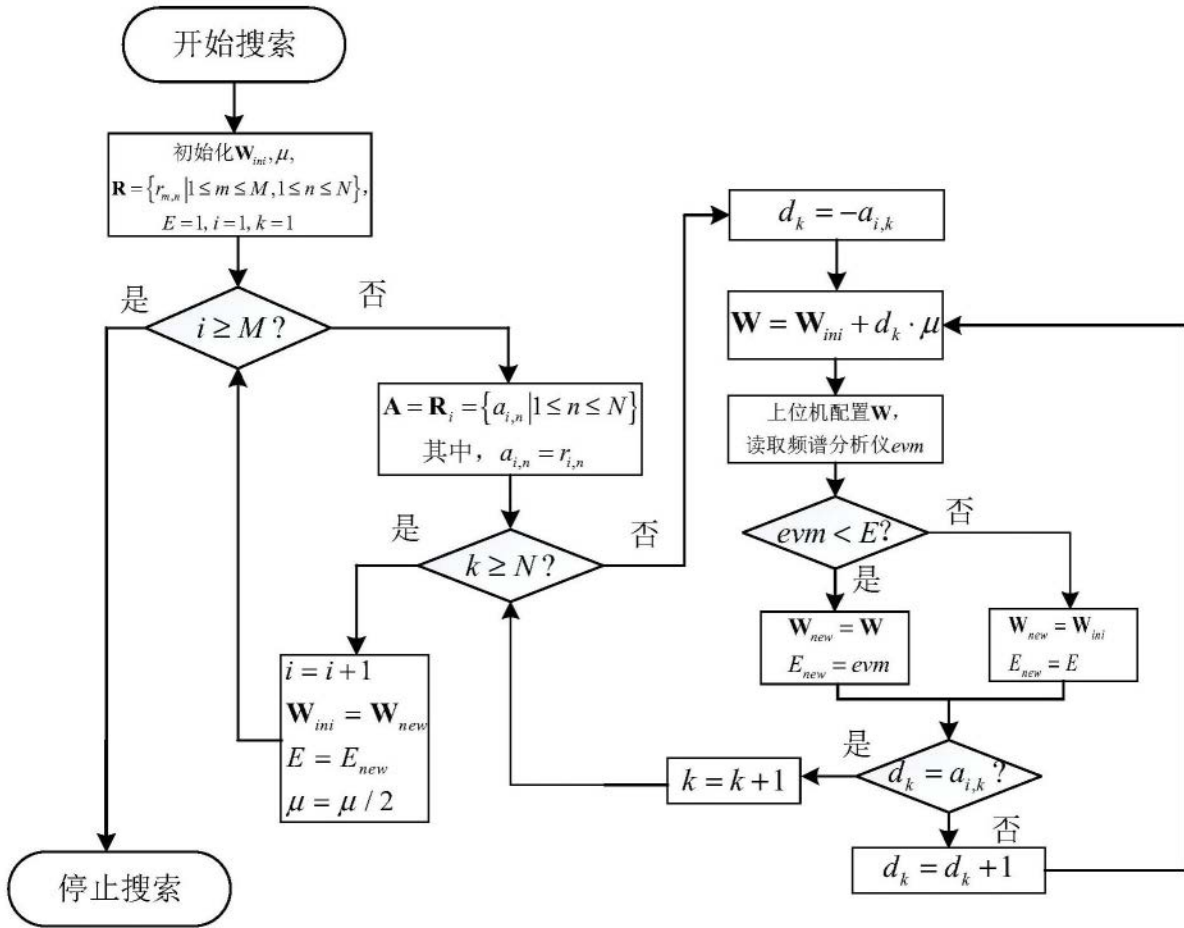


图2