

平坦度的补偿方法和装置、存储介质和电子设备

技术领域

本发明涉及通信领域，具体而言，涉及一种平坦度的补偿方法和装置、存储介质和电子设备。

背景技术

在通信领域中，随着 4G/5G 的应用，无线电收发信机的工作频带越来越宽，达到了几百兆赫兹。在如此宽的频率范围内，射频器件的增益平坦度难以得到保证。需要采用滤波器对基带信号进行增益预补偿来解决设备硬件由于增益不平衡造成的带内增益不平坦问题。相关技术中，可以使用常规的 IFFT 或训练的方法进行滤波器生成，然后使用生成的滤波器进行增益预补偿，但是，采用 IFFT 或训练的方法生成的滤波器，对基带信号的补偿效果较差，并且通过这种方式生成的滤波器通常无法准确地评估补偿后的带内平坦度峰-峰值。因此，针对相关技术中，通过常规的 IFFT 或训练的方法生成的滤波器对基带信号进行预补偿，存在补偿效果差的问题，尚未提出有效的技术方案。

发明内容

本发明实施例提供了一种平坦度的补偿方法和装置、存储介质和电子设备，至少解决相关技术中，通过常规的 IFFT 或训练的方法生成的滤波器对基带信号进行预补偿，存在补偿效果差的技术问题。

根据本发明实施例的一个方面，提供了平坦度的补偿方法，包括：以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样，得到增益序列；根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列，其中，上述增益参考值为期望的平坦链路增益值；以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取，得到初始修正序列，其中，上述初始修正序列为上述偏差序列的子序列；对上述初始修正序列进行优化，得到优化修正序列；对上述优化修正序列进行转换，得到滤波器抽头系数；根据上述滤波器抽头系数生成目标滤波器，使用上述目标滤波器对上述基带信号进行补偿。

根据本发明实施例的另一方面，还提供了平坦度的补偿装置，包括：第一处理单元，设置为以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样，得到增益序列；第二处理单元，设置为根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列，其中，上述增益参考值为期望的平坦链路增益值；第三处理单元，设置为以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取，得到初始修正序列，其中，上述初始修正序列为上述偏差序列的子序列；优化单元，设置为对上述初始修正序列进行优化，得到优化修正序列；转换单元，设置为对上述优化修正序列进行转换，得到滤波器抽头系数；第四处理单元，设置为根据上述滤波器抽头系数生成目标滤波器，使用上述目标滤波器对上述基带信号进行补偿。

根据本发明实施例的又一方面，还提供了一种计算机可读的存储介质，该计算机可读的存储介质中存储有计算机程序，其中，该计算机程序被设置为运行时执行上述平坦度的补偿方法。

根据本发明实施例的又一方面，还提供了一种电子装置，包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序，其中，上述处理器通过计算机程序执行上述的平坦度的补偿方法。

通过本发明，以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样，得到增益序列；根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列，其中，上述增益参考值为期望的平坦链路增益值；以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取，得到初始修正序列，其中，上述初始修正序列为上述偏差序列的子序列；对上述初始修正序列进行优化，得到优化修正序列；对上述优化修正序列进行转换，得到滤波器抽头系数；根据上述滤波器抽头系数生成目标滤波器，使用上述目标滤波器对上述基带信号进行补偿。采用上述方式，通过对基带信号进行过采样的过程中，能够获取到更多的基带信号的信息，然后根据这些信息按照上述方式一步步确定出滤波器抽头系数，能够使得到的滤波器抽头系数更加精确，最终，根据该滤波器抽头系数生成目标滤波器，并使用目标滤波器来对基带信号进行补偿，提高了对基带信号的补偿效果。

附图说明

此处所说明的附图用来提供对本发明的进一步理解，构成本申请的一部分，本发明的示意性实施例及其说明设置为解释本发明，并不构成对本发明的不当限定。在附图中：

图 1 是根据本发明实施例的平坦度的补偿方法的应用环境的示意图；

图 2 是根据本发明实施例的一种可选的平坦度的补偿方法的流程示意图；

图 3 是根据本发明实施例的另一种可选的平坦度的补偿方法的流程示意图；

图 4 是根据本发明实施例的一种可选的平坦度的补偿装置的结构示意图；

图 5 是根据本发明实施例的一种可选的电子装置的结构示意图。

具体实施方式

为了使本技术领域的人员更好地理解本发明方案，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的实施例，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，都应当属于本发明保护的范围。

需要说明的是，本发明的说明书和权利要求书及上述附图中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象，而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的数据在适当情况下可以互换，以便这里描述的本发明的实施例能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施。此外，术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形，意图在于覆盖不排他的包含，例如，包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元，而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

本申请实施例中所提供的方法实施例可以在移动终端、计算机终端或者类似的运

算装置中执行。以运行在移动终端上为例，图 1 是本发明实施例的一种平坦度的补偿方法的移动终端的硬件结构框图。如图 1 所示，移动终端可以包括一个或多个（图 1 中仅示出一个）处理器 102（处理器 102 可以包括但不限于微处理器 MCU 或可编程逻辑器件 FPGA 等的处理装置）和设置为存储数据的存储器 104，其中，上述移动终端还可以包括设置为通信功能的传输设备 106 以及输入输出设备 108。本领域普通技术人员可以理解，图 1 所示的结构仅为示意，其并不对上述移动终端的结构造成限定。例如，移动终端还可包括比图 1 中所示更多或者更少的组件，或者具有与图 1 所示不同的配置。

存储器 104 可设置为存储计算机程序，例如，应用程序的软件程序以及模块，如本发明实施例中的平坦度的补偿方法对应的计算机程序，处理器 102 通过运行存储在存储器 104 内的计算机程序，从而执行各种功能应用以及平坦度的补偿，即实现上述的方法。存储器 104 可包括高速随机存储器，还可包括非易失性存储器，如一个或者多个磁性存储装置、闪存、或者其他非易失性固态存储器。在一些实例中，存储器 104 可进一步包括相对于处理器 102 远程设置的存储器，这些远程存储器可以通过网络连接至移动终端。上述网络的实例包括但不限于互联网、企业内部网、局域网、移动通信网及其组合。

传输装置 106 设置为经由一个网络接收或者发送数据。上述的网络具体实例可包括移动终端的通信供应商提供的无线网络。在一个实例中，传输装置 106 包括一个网络适配器（Network Interface Controller，简称为 NIC），其可通过基站与其他网络设备相连从而可与互联网进行通讯。在一个实例中，传输装置 106 可以为射频（Radio Frequency，简称为 RF）模块，其设置为通过无线方式与互联网进行通讯。

可选地，在本实施例中，上述终端设备可以包括但不限于以下至少之一：手机（如 Android 手机、iOS 手机等）、笔记本电脑、平板电脑、掌上电脑、MID（Mobile Internet Devices，移动互联网设备）、PAD、台式电脑等。上述网络可以包括但不限于：有线网络，无线网络，其中，该有线网络包括：局域网、城域网和广域网，该无线网络包括：蓝牙、WIFI 及其他实现无线通信的网络。上述服务器可以是单一服务器，也可以是由多个服务器组成的服务器集群。上述只是一种示例，本实施例对此不做任何限定。

可选地，作为一种可选的实施方式，如图 2 所示，上述平坦度的补偿方法的流程可以包括步骤：

步骤 S202，以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样，得到增益序列。

可选地，在对基带信号进行采样时，可以设置过采样间隔，以过采样的方式对以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样，来得到增益序列。

步骤 S204，根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列，其中，上述增益参考值为期望的平坦链路增益值。

可选地，可以预先设置增益参考值，然后根据增益序列和该增益参考值来生成一个偏差序列，其中，上述增益参考值为期望的平坦链路增益值。

步骤 S206, 以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取, 得到初始修正序列, 其中, 上述初始修正序列为上述偏差序列的子序列。

可选地, 在上述偏差序列的基础上, 以过采样间隔对应的过采样倍数对该偏差序列进行进一步的处理, 可以得到上述初始修正序列, 该初始修正序列为上述偏差序列的子序列。

步骤 S208, 对上述初始修正序列进行优化, 得到优化修正序列。

可选地, 对上述初始修正序列进行进一步的优化, 如以迭代的方式, 来对该初始修正序列进行优化, 来得到优化修正序列。

步骤 S210, 对上述优化修正序列进行转换, 得到滤波器抽头系数。

可选地, 在上述初始优化修正序列的基础上, 对优化修正序列进行转换, 得到滤波器抽头系数。

步骤 S212, 根据上述滤波器抽头系数生成目标滤波器, 使用上述目标滤波器对上述基带信号进行补偿。

可选地, 按照上述步骤可以得到滤波器抽头系数, 然后根据该滤波器抽头系数生成目标滤波器, 那么, 可以使用该目标滤波器对基带信号进行补偿。通过滤波器对基带信号进行增益预补偿, 能够解决设备硬件由于增益不平衡造成的带内增益不平坦问题。

需要说明的是, 上述目标滤波器可以为 FIR 滤波器。

可选地, 上述平坦度的补偿方法可以但不限于应用于通信系统中通过滤波器对基带信号进行增益预补偿等场景中。例如, 使用接收机接收基带信号、使用发射机发射基带信号的场景中, 均可以以按照上述平坦度的补偿方法对基带信号进行补偿。

通过本实施例, 以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样, 得到增益序列; 根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列, 其中, 上述增益参考值为期望的平坦链路增益值; 以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取, 得到初始修正序列, 其中, 上述初始修正序列为上述偏差序列的子序列; 对上述初始修正序列进行优化, 得到优化修正序列; 对上述优化修正序列进行转换, 得到滤波器抽头系数; 根据上述滤波器抽头系数生成目标滤波器, 使用上述目标滤波器对上述基带信号进行补偿。采用上述方式, 通过对基带信号进行过采样的过程中, 能够获取到更多的基带信号的信息, 然后根据这些信息按照上述方式一步步确定出滤波器抽头系数, 能够使得到的滤波器抽头系数更加精确, 最终, 根据该滤波器抽头系数生成目标滤波器, 并使用目标滤波器来对基带信号进行补偿, 提高了对基带信号的补偿效果。

在一种可选的实施例中, 在上述以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样之前, 上述方法还包括: 设置滤波器抽头系数数量 N 和补偿区间 R , 其中, 上述 N 为大于或等于 2 的整数, 上述补偿区间 $R \in [F_c - F_s/2, F_c + F_s/2]$, 上述 F_c 为上述基带信号对应的射频中心频点, 上述 F_s 为基带信号采样率; 上述以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样, 得到增益序列, 包括: 以上述过采样间隔对上述收发机链路在上述基带信号的上述补偿区间 R 内的增

益进行采样,得到 $N \times K$ 个增益值,根据上述 $N \times K$ 个增益值得到上述增益序列,其中,上述频率范围包括上述补偿区间 R ,上述过采样间隔 $= F_s/(N \times K)$,上述 K 为上述过采样倍数,上述 K 为大于或等于 2 的整数,上述增益序列为 $G(n) = \{g(0), g(1), \dots, g(N \times K - 1)\}$,上述 $N \times K$ 个增益值为 $g(0), g(1), \dots, g(N \times K - 1)$ 。

可选地,根据硬件资源消耗选择合适的滤波器抽头系数数量 N ,其中 N 为大于等于 2 的整数。

设置进行补偿的射频频率区间 R , R 可以是单个区间,也可能是多个区间。 R 满足 $R \in [F_c - F_s/2, F_c + F_s/2]$,其中 F_c 为基带信号对应的射频中心频点, F_s 为基带信号采样率。然后以基带信号 DC 对应的射频频点 F_c 为原点,以 $F_s/(N \times K)$ 为过采样间隔,测试频率区间 $[F_c - F_s/2, F_c + F_s/2]$ 共 $N \times K$ 个采样点的增益值。将测得的增益值按照频率从小到大排列得到序列 $G(n) = \{g(0), g(1), \dots, g(N \times K - 1)\}$,其中,增益值的单位为 Db , K 为过采样倍数。

可选地,本实施例中,上述根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列,包括:根据以下公式生成上述偏差序列:

$$C(n) = \begin{cases} T - G(n) & f(n) \in R, \\ A & f(n) \notin R, \end{cases}$$

其中,上述 $G(n)$ 为上述增益序列,上述 $C(n)$ 为上述偏差序列,上述 T 为上述增益参考值,上述 $f(n)$ 为与上述基带信号对应的 n 个射频频点相关的函数,上述 A 为上述目标滤波器的期望阻带增益,上述 A 为根据上述 N 所设置的预设值。

其中,上述 $f(n)$ 为 $G(n)$ 序列中元素索引与基带信号对应的射频频点的映射函数,偏差序列是目标滤波器响应的目标参考。 A 为目标滤波器的期望阻带增益,通常根据滤波器抽头系数数量进行设置,一般可通过公式 $A = -10 \cdot \log_2(N)$ 进行设置。

在一种可选的实施例中,上述以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取,得到初始修正序列,包括:根据以下公式得到上述初始修正序列:

$$D(n) = \begin{cases} C(Kn) & N \text{ 为奇数} \\ C(Kn + 1) & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (n = 0, 1, \dots, N - 1);$$

其中,上述 $C(n)$ 为上述偏差序列,上述 $D(n)$ 为上述初始修正序列,上述 K 为上述过采样间隔对应的过采样倍数,上述 K 为大于或等于 2 的整数。

在一种可选的实施例中,上述对上述初始修正序列进行优化,得到优化修正序列,包括:将上述初始修正序列输入至迭代器;根据以下公式在上述迭代器中对上述初始修正序列进行迭代优化:

$$P = \begin{bmatrix} B(n) \\ \vdots \\ B(n) \end{bmatrix} + STEP \cdot I_N;$$

$$M = \begin{bmatrix} B(n) \\ \vdots \\ B(n) \end{bmatrix} - STEP \cdot I_N;$$

其中,上述 P 和上述 M 均为 N*N 的扰动矩阵,上述 STEP 为迭代步长,IN 为 N*N 的单位矩阵,上述 B(n)的初始序列为上述初始修正序列 D(n);对上述 P 和上述 M 中每一行中的元素进行滤波器转换,并计算上述 P 和上述 M 中每一行中的元素的偏差值;将上述每一行中的元素的偏差值分别存入对应的结果矩阵 Rp 和 Rm 的对应行中;确定上述 Rp 和上述 Rm 中的最小值,将最小值对应矩阵的对应行元素序列作为上述迭代器输出的一次修正序列 R(n);在达到收敛条件的情况下,将最后一次输出的 R(n)修正序列确定为上述优化修正序列 O(n)。

可选地,将上述初始修正序列输入至迭代器,按照上述方式初始修正序列进行处理,得到迭代器第一次输出的结果 R(n),将第一次的输出结果再一次输入上述迭代器中,并按照上述方式继续循环处理,得到第二次的输出结果 R(n),……,以此类推,直到达到收敛条件,则将迭代器最后一次的输出结果作为最终的优化修正序列 O(n)。

在一种可选的实施例中,上述对上述优化修正序列进行转换,得到滤波器抽头系数,包括:根据以下公式得到上述滤波器抽头系数:

$$L(n) = 10^{\frac{O(n)}{20}}, n=(0,1,\dots,N-1);$$

$$H(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{L(k)}{N} \cdot \exp \left[\frac{2i\pi}{N} * \left(n - \frac{N-1}{2} \right) * \left(k - \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \right) \right];$$

其中,上述 H(n)为上述滤波器抽头系数,上述 O(n)为优化修正序列。

需要说明的是,上述 i 为复数符号。

在一种可选的实施例中,在上述对上述优化修正序列进行转换,得到滤波器抽头系数之后,上述方法还包括:根据以下公式得到偏差值序列和目标偏差值:

$$K(n) = \begin{cases} H(n) & 0 \leq n < N; \\ 0 & N \leq n < K * N; \end{cases}$$

$$P(n) = DFT(K(n)), n = 0, 1, 2, \dots, K * N - 1;$$

$$Q(n) = \{P\left(\left\lfloor \frac{KN}{2} \right\rfloor\right), P\left(\left\lfloor \frac{KN}{2} \right\rfloor + 1\right), \dots, P(KN - 1), P(0), P(1) \dots P\left(\left\lfloor \frac{KN}{2} \right\rfloor - 1\right)\};$$

$$M(n) = 20 * \log_{10}(|Q(n)|) \quad n = 0, 1, \dots, N * K - 1;$$

$$E(n) = \begin{cases} C(n) - M(n) & f(n) \in R; \\ 0 & f(n) \notin R; \end{cases}$$

$$E = \text{Max}(E(n)) - \text{Min}(E(n));$$

根据上述 E(n)生成补偿曲线,根据上述补偿曲线和上述目标偏差值 E 对上述基带信号的补偿效果进行评估,其中,上述 E(n)为上述偏差值序列,上述 E 为上述目标偏差值,上述 E 为上述补偿曲线的平坦度峰-峰值的评估值。

下面结合一可选示例对平坦度的补偿方法的流程进行说明,如图 3 所示,该方法可以包括以下步骤:

需要说明的是,接收机和发射机的测试步骤中要求测试间隔频率=基带信号采样率/抽头系数数量,为了减少资源消耗,当抽头系数数量较少时,测试间隔较大,测试数据无法反应带内增益的高频波动,细节丢失,最终导致补偿性能下降。采用 IFFT 或训

练的方法生成的滤波器通常无法准确地评估补偿后的带内平坦度峰-峰值。因此，需要找到更加合适的抽头系数，才能使补偿性能更好，更好的评估补偿后的带内平坦度峰-峰值。

步骤 1，设置滤波器抽头数。可选地，根据硬件资源消耗选择合适的滤波器抽头系数数量 N ，其中 N 为大于等于 2 的整数。

步骤 2，设置进行补偿的射频频率区间 R 。可选地， R 可以是单个区间，也可能是多个区间。 R 满足 $R \in [F_c - F_s/2, F_c + F_s/2]$ ，其中 F_c 为射频中心频点， F_s 为基带信号采样率。

步骤 3，增益曲线测量。可选地，以基带信号 DC 对应的射频频点 F_c 为原点，以 $F_s/(N \cdot K)$ 为过采样间隔，测试频率区间 $[F_c - F_s/2, F_c + F_s/2]$ 共 $N \cdot K$ 个采样点的增益值。测得的增益值按照频率从小到大排列得到序列 $G(n) = \{g(0), g(1), \dots, g(N \cdot K - 1)\}$ ，其中，增益值的单位为 Db ， K 为过采样倍数。

步骤 4，设置增益参考值 T 。可选地，参考值 T 即期望的平坦的链路增益值。

步骤 5，生成偏差序列 $C(n)$ 。可选地，按照以下公式生成偏差序列 $C(n)$ ：

$$C(n) = \begin{cases} T - G(n) & f(n) \in R \\ A & f(n) \notin R \end{cases}$$

其中， $f(n)$ 为 $G(n)$ 序列中元素索引与基带信号的射频频点的映射函数，偏差序列是补偿滤波器响应的目标参考。 T 是增益参考值，即期望的平坦的链路增益值。 A 为目标滤波器的期望阻带增益，通常根据滤波器抽头数进行设置，一般可通过公式 $A = -10 \cdot \log_2(N)$ 进行设置。

步骤 6，生成初始修正序列 $D(n)$ 。可选地， $D(n)$ 为偏差序列的子序列，其中， $C(n)$ 是 $D(n)$ 的 K 倍，从 $C(n)$ 中选择一部分出来值可以得到 $D(n)$ 。

$$D(n) = \begin{cases} C(Kn) & N \text{ 为奇数} \\ C(Kn + 1) & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (n = 0, 1, \dots, N - 1)。$$

步骤 7，生成优化修正序列 $O(n)$ 。可选地，优化修正序列 $O(n)$ 的生成方法具体如下：步骤 (1) 迭代器输入为长度为 N 的修正序列 $B(n)$ ，其中， $B(n)$ 的初始序列为上述初始修正序列 $D(n)$ 。步骤 (2) 引入 $N \cdot N$ 的扰动矩阵 P ， M 定义如下：

$$P = \begin{bmatrix} B(n) \\ \vdots \\ B(n) \end{bmatrix} + STEP \cdot I_N;$$

$$M = \begin{bmatrix} B(n) \\ \vdots \\ B(n) \end{bmatrix} - STEP \cdot I_N;$$

其中， $STEP$ 为搜索迭代算法的步长， I_N 为 $N \cdot N$ 的单位矩阵。

步骤 (3) 对 P ， M 矩阵每一行中的元素进行滤波器转换，并计算其偏差值 E ，其结果分别存入对应结果矩阵 R_p 以及 R_m 的对应行中。结果矩阵大小为 $1 \cdot N$ 。

步骤 (4) 比较并获得 R_p 以及 R_m 中最小的单元，作为当前迭代的偏差值输出。

取最小值对应矩阵的对应行元素序列作为迭代输出修正序列 $R(n)$ 。

需要说明的是,上述步骤(1)~(4)中的迭代步长可以按照以下方式设置:通过将迭代输出的 $R(n)$ 传递给迭代输入 $B(n)$ 可通过多次循环上述步骤(1)~(4)得到优化修正序列 $O(n)$ 以及最终偏差值 E_f 。迭代可以改变步长值进行多段执行,例如 STEP=0.1 迭代一定次数后采用更小的步长 0.01 再进行迭代,从而优化收敛速度与性能。

可选地,在确定优化修正序列 $O(n)$ 的过程中,收敛条件可以按照以下方式设置:
1、固定迭代次数;2、迭代一定次数后偏差值 E 不再发生显著变化(如小于设定阈值);
3、偏差值 E 达到系统预期。

可选地,滤波器转换方法如下:假设输入为修正序列 $O(n)$,输出为滤波器抽头系数 $H(n)$,长度均为 N 。

将以 Db 为单位的修正序列 $O(n)$ 转化为线性修正序列 $L(n)$ 。

$$L(n) = 10^{\frac{O(n)}{20}} n = (0, 1, \dots, N-1);$$

$$H(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{L(k)}{N} \cdot \exp \left[\frac{2i\pi}{N} * \left(n - \frac{N-1}{2} \right) * \left(k - \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \right) \right];$$

可选地,以下详述如何生成偏差值:

输入为滤波器抽头系数 $H(n)$,偏差序列 $C(n)$,输出为偏差值 E ,偏差值越小代表滤波器抽头系数的补偿效果越好,生成方法如下:

S1,对 $H(n)$ 进行补 0,得到新的序列 $K(n)$,具体公式如下:

$$K(n) = \begin{cases} H(n) & 0 \leq n < N; \\ 0 & N \leq n < K * N; \end{cases}$$

S2,对 $K(n)$ 执行 $K*N$ 点 DFT 处理,得到序列 $P(n)$,具体公式如下:

$$P(n) = DFT(K(n)), n = 0, 1, 2, \dots, K * N - 1;$$

S3,对 $P(n)$ 进行顺序调整,前后部分交换,得到新的序列 $Q(n)$,具体公式如下:

$$Q(n) = \{P\left(\left\lfloor \frac{KN}{2} \right\rfloor\right), P\left(\left\lfloor \frac{KN}{2} \right\rfloor + 1\right), \dots, P(KN-1), P(0), P(1) \dots P\left(\left\lfloor \frac{KN}{2} \right\rfloor - 1\right)\};$$

S4,对 $Q(n)$ 中各元素进行模运算,取对数得到 $M(n)$,具体公式如下:

$$M(n) = 20 * \log_{10}(|Q(n)|) \quad n = 0, 1, \dots, NK - 1;$$

$M(n)$ 是该滤波器系数 $H(n)$ 在 S3 中各采样点上的增益补偿值,并且按照频率从小到大进行排列。

S5,计算补偿偏差序列 $E(n)$,该序列反应了该滤波器在各频点上的补偿残差,具体公式如下:

$$E(n) = \begin{cases} C(n) - M(n) & f(n) \in R; \\ 0 & f(n) \notin R; \end{cases}$$

S6,计算偏差值 $E = \text{Max}(E(n)) - \text{Min}(E(n))$;

利用偏差值序列 $E(n)$ 中的最大值减去最小值即得到偏差值。

步骤 8, 生成滤波器抽头系数。

利用步骤 7 中介绍滤波器转换方法对 $O(n)$ 进行滤波器转换得到最终 FIR 滤波器的抽头系数。

步骤 9, 生成补偿曲线。

取迭代结束时的 $T - E(n)$ 形成的序列即代表了补偿后系统增益的预期曲线, 得到的 E 即补偿后系统平坦度峰-峰值的评估值。

通过本实施例, 在 FIR 滤波器抽头系数不变、以及导致的硬件资源消耗不变的情况下, 通过上述方式得到的滤波器抽头系数能获得更好的补偿效果, 通过过采样间隔获取更多的基带信号的信息, 对这些信息进行综合处理, 使用迭代的算法, 找一个更合适的滤波器抽头系数, 在最终生成的滤波器抽头系数不变的情况下, 能够拥有更好的曲线, 最终得到更能够补偿曲线的滤波器, 提高了补偿效果。

需要说明的是, 对于前述的各方法实施例, 为了简单描述, 故将其都表述为一系列的动作组合, 但是本领域技术人员应该知悉, 本发明并不受所描述的动作顺序的限制, 因为依据本发明, 某些步骤可以采用其他顺序或者同时进行。其次, 本领域技术人员也应该知悉, 说明书中所描述的实施例均属于优选实施例, 所涉及的动作和模块并不一定是本发明所必须的。

根据本发明实施例的又一方面, 还提供了平坦度的补偿装置, 如图 3 所示, 该装置包括:

第一处理单元 402, 设置为以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样, 得到增益序列;

第二处理单元 404, 设置为根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列, 其中, 上述增益参考值为期望的平坦链路增益值;

第三处理单元 406, 设置为以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取, 得到初始修正序列, 其中, 上述初始修正序列为上述偏差序列的子序列;

优化单元 408, 设置为对上述初始修正序列进行优化, 得到优化修正序列;

转换单元 410, 设置为对上述优化修正序列进行转换, 得到滤波器抽头系数;

第四处理单元 412, 设置为根据上述滤波器抽头系数生成目标滤波器, 使用上述目标滤波器对上述基带信号进行补偿。

通过本实施例, 以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样, 得到增益序列; 根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列, 其中, 上述增益参考值为期望的平坦链路增益值; 以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取, 得到初始修正序列, 其中, 上述初始修正序列为上述偏差序列的子序列; 对上述初始修正序列进行优化, 得到优化修正序列; 对上述优化修正序列进行转换, 得到滤波器抽头系数; 根据上述滤波器抽头系数生成目标滤波器, 使用上述目标滤波器对上述基带信号进行补偿。采用上述方式, 通过对基带信号进行过采样的过程中, 能够获取到更多的基带信号的信息, 然后根据这些信息按照上述方式一步步

确定出滤波器抽头系数, 能够使得到的滤波器抽头系数更加精确, 最终, 根据该滤波器抽头系数生成目标滤波器, 并使用目标滤波器来对基带信号进行补偿, 提高了对基带信号的补偿效果。

作为一种可选的技术方案, 上述装置还包括: 设置单元, 设置为在上述以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样之前, 设置滤波器抽头数量 N 和补偿区间 R , 其中, 上述 N 为大于或等于 2 的整数, 上述补偿区间 $R \in [F_c - F_s/2, F_c + F_s/2]$, 上述 F_c 为上述基带信号对应的射频中心频点, 上述 F_s 为基带信号采样率; 第一处理单元, 还设置为以上述过采样间隔对上述收发机链路在上述基带信号的上述补偿区间 R 内的增益进行采样, 得到 $N \cdot K$ 个增益值, 根据上述 $N \cdot K$ 个增益值得到上述增益序列, 其中, 上述频率范围包括上述补偿区间 R , 上述过采样间隔 $= F_s/(N \cdot K)$, 上述 K 为上述过采样倍数, 上述 K 为大于或等于 2 的整数, 上述增益序列为 $G(n) = \{g(0), g(1), \dots, g(N \cdot K - 1)\}$, 上述 $N \cdot K$ 个增益值为 $g(0), g(1), \dots, g(N \cdot K - 1)$ 。

作为一种可选的技术方案, 上述第二处理单元, 还设置为根据以下公式生成上述偏差序列:

$$C(n) = \begin{cases} T - G(n) & f(n) \in R, \\ A & f(n) \notin R, \end{cases}$$

其中, 上述 $G(n)$ 为上述增益序列, 上述 $C(n)$ 为上述偏差序列, 上述 T 为上述增益参考值, 上述 $f(n)$ 为与上述基带信号对应的 n 个射频频点相关的函数, 上述 A 为上述目标滤波器的期望阻带增益, 上述 A 为根据上述 N 所设置的预设值。

作为一种可选的技术方案, 上述第三处理单元, 还设置为根据以下公式得到上述初始修正序列:

$$D(n) = \begin{cases} C(Kn) & N \text{ 为奇数} \\ C(Kn + 1) & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (n = 0, 1, \dots, N - 1);$$

其中, 上述 $C(n)$ 为上述偏差序列, 上述 $D(n)$ 为上述初始修正序列, 上述 K 为上述过采样间隔对应的过采样倍数, 上述 K 为大于或等于 2 的整数。

作为一种可选的技术方案, 上述优化单元, 还设置为将上述初始修正序列输入至迭代器; 根据以下公式在上述迭代器中对上述初始修正序列进行迭代优化:

$$P = \begin{bmatrix} B(n) \\ \vdots \\ B(n) \end{bmatrix} + STEP \cdot I_N;$$

$$M = \begin{bmatrix} B(n) \\ \vdots \\ B(n) \end{bmatrix} - STEP \cdot I_N;$$

其中, 上述 P 和上述 M 均为 $N \cdot N$ 的扰动矩阵, 上述 $STEP$ 为迭代步长, I_N 为 $N \cdot N$ 的单位矩阵, 上述 $B(n)$ 的初始序列为上述初始修正序列 $D(n)$; 对上述 P 和上述 M 中每一行中的元素进行滤波器转换, 并计算上述 P 和上述 M 中每一行中的元素的偏差值; 将上述每一行中的元素的偏差值分别存入对应的结果矩阵 R_p 和 R_m 的对应行中; 确定上述 R_p 和上述 R_m 中的最小值, 将最小值对应矩阵的对应行元素序列作为上述迭

代器输出的一次修正序列 $R(n)$; 在达到收敛条件的情况下, 将最后一次输出的 $R(n)$ 修正序列确定为上述优化修正序列 $O(n)$ 。

作为一种可选的技术方案, 上述转换单元, 还设置为根据以下公式得到上述滤波器抽头系数:

$$L(n) = 10^{\frac{O(n)}{20}}, n=(0,1,\dots,N-1);$$

$$H(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{L(k)}{N} \cdot \exp \left[\frac{2i\pi}{N} * \left(n - \frac{N-1}{2} \right) * \left(k - \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \right) \right];$$

其中, 上述 $H(n)$ 为上述滤波器抽头系数, 上述 $O(n)$ 为优化修正序列。

作为一种可选的技术方案, 上述装置还包括: 根据以下公式得到偏差值序列和目标偏差值:

$$K(n) = \begin{cases} H(n) & 0 \leq n < N, \\ 0 & N \leq n < K * N, \end{cases}$$

$$P(n) = DFT(K(n)), n = 0, 1, 2, \dots, K * N - 1;$$

$$Q(n) = \{P\left(\left\lfloor \frac{KN}{2} \right\rfloor\right), P\left(\left\lfloor \frac{KN}{2} \right\rfloor + 1\right), \dots, P(KN - 1), P(0), P(1) \dots P\left(\left\lfloor \frac{KN}{2} \right\rfloor - 1\right)\};$$

$$M(n) = 20 * \log_{10}(|Q(n)|) \quad n = 0, 1, \dots, N * K - 1;$$

$$E(n) = \begin{cases} C(n) - M(n) & f(n) \in R, \\ 0 & f(n) \notin R, \end{cases}$$

$$E = \text{Max}(E(n)) - \text{Min}(E(n));$$

根据上述 $E(n)$ 生成补偿曲线, 根据上述补偿曲线和上述目标偏差值 E 对上述基带信号的补偿效果进行评估, 其中, 上述 $E(n)$ 为上述偏差值序列, 上述 E 为上述目标偏差值, 上述 E 为上述补偿曲线的平坦度峰-峰值的评估值。

根据本发明的实施例的又一方面, 还提供了一种存储介质, 该存储介质中存储有计算机程序, 其中, 该计算机程序被设置为运行时执行上述任一项方法实施例中的步骤。

可选地, 在本实施例中, 上述存储介质可以被设置为存储设置为执行以下步骤的计算机程序: S1, 以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样, 得到增益序列; S2, 根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列, 其中, 上述增益参考值为期望的平坦链路增益值; S3, 以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取, 得到初始修正序列, 其中, 上述初始修正序列为上述偏差序列的子序列; S4, 对上述初始修正序列进行优化, 得到优化修正序列; S5, 对上述优化修正序列进行转换, 得到滤波器抽头系数; S6, 根据上述滤波器抽头系数生成目标滤波器, 使用上述目标滤波器对上述基带信号进行补偿。

可选地, 在本实施例中, 上述存储介质可以被设置为存储设置为执行以上各步骤的计算机程序。

可选地, 在本实施例中, 本领域普通技术人员可以理解上述实施例的各种方法中的全部或部分步骤是可以通过程序来指令终端设备相关的硬件来完成, 该程序可以存

储于一计算机可读存储介质中,存储介质可以包括:闪存盘、ROM(Read-Only Memory,只读存储器)、RAM(Random Access Memory,随机存取器)、磁盘或光盘等。

根据本发明实施例的又一个方面,还提供了一种设置为实施上述平坦度的补偿方法的电子装置,如图5所示,该电子装置包括存储器502和处理器505,该存储器502中存储有计算机程序,该处理器504被设置为通过计算机程序执行上述任一项方法实施例中的步骤。

可选地,在本实施例中,上述电子装置可以位于计算机网络的多个网络设备中的至少一个网络设备。

可选地,在本实施例中,上述处理器可以被设置为通过计算机程序执行以下步骤:S1,以过采样间隔对收发机链路在基带信号影响的频率范围内的增益进行采样,得到增益序列;S2,根据上述增益序列和增益参考值生成偏差序列,其中,上述增益参考值为期望的平坦链路增益值;S3,以上述过采样间隔对应的过采样倍数对上述偏差序列进行抽取,得到初始修正序列,其中,上述初始修正序列为上述偏差序列的子序列;S5,对上述初始修正序列进行优化,得到优化修正序列;S5,对上述优化修正序列进行转换,得到滤波器抽头系数;S6,根据上述滤波器抽头系数生成目标滤波器,使用上述目标滤波器对上述基带信号进行补偿。

可选地,本领域普通技术人员可以理解,图5所示的结构仅为示意,电子装置也可以是智能手机(如Android手机、iOS手机等)、平板电脑、掌上电脑以及移动互联网设备(Mobile Internet Devices, MID)、PAD等终端设备。图5其并不对上述电子装置的结构造成限定。例如,电子装置还可包括比图5中所示更多或者更少的组件(如网络接口等),或者具有与图5所示不同的配置。其中,存储器502可设置为存储软件程序以及模块,如本发明实施例中的平坦度的补偿方法和装置对应的程序指令/模块,处理器504通过运行存储在存储器502内的软件程序以及模块,从而执行各种功能应用以及平坦度的补偿,即实现上述的平坦度的补偿方法。存储器502可包括高速随机存储器,还可以包括非易失性存储器,如一个或者多个磁性存储装置、闪存、或者其他非易失性固态存储器。在一些实例中,存储器502可进一步包括相对于处理器504远程设置的存储器,这些远程存储器可以通过网络连接至终端。上述网络的实例包括但不限于互联网、企业内部网、局域网、移动通信网及其组合。其中,存储器502具体可以但不限于设置为存储目标对象的目标高度等信息。作为一种示例,如图5所示,上述存储器502中可以但不限于包括上述平坦度的补偿装置中的第一处理单元402、第二处理单元404、第三处理单元406、优化单元408、转换单元410、第四处理单元412。此外,还可以包括但不限于上述平坦度的补偿装置中的其他模块单元,本示例中不再赘述。

可选地,上述的传输装置506设置为经由一个网络接收或者发送数据。上述的网络具体实例可包括有线网络及无线网络。在一个实例中,传输装置506包括一个网络适配器(Network Interface Controller, NIC),其可通过网线与其他网络设备与路由器相连从而可与互联网或局域网进行通讯。在一个实例中,传输装置506为射频(Radio Frequency, RF)模块,其设置为通过无线方式与互联网进行通讯。

此外,上述电子装置还包括:连接总线508,设置为连接上述电子装置中的各个模块部件。

在其他实施例中，上述终端或者服务器可以是一个分布式系统中的一个节点，其中，该分布式系统可以为区块链系统，该区块链系统可以是由该多个节点通过网络通信的形式连接形成的分布式系统。其中，节点之间可以组成点对点（P2P, Peer To Peer）网络，任意形式的计算设备，比如服务器、终端等电子设备都可以通过加入该点对点网络而成为该区块链系统中的一个节点。

可选地，在本实施例中，本领域普通技术人员可以理解上述实施例的各种方法中的全部或部分步骤是可以通程序来指令终端设备相关的硬件来完成，该程序可以存储于一计算机可读存储介质中，存储介质可以包括：闪存盘、只读存储器（Read-Only Memory, ROM）、随机存取器（Random Access Memory, RAM）、磁盘或光盘等。

上述本发明实施例序号仅仅为了描述，不代表实施例的优劣。

上述实施例中的集成的单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用时，可以存储在上述计算机可读的存储介质中。基于这样的理解，本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在存储介质中，包括若干指令用以使得一台或多台计算机设备（可为个人计算机、服务器或者网络设备等）执行本发明各个实施例方法的全部或部分步骤。

在本发明的上述实施例中，对各个实施例的描述都各有侧重，某个实施例中没有详述的部分，可以参见其他实施例的相关描述。

在本申请所提供的几个实施例中，应该理解到，所揭露的客户端，可通过其它的方式实现。其中，以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的，例如单元的划分，仅仅为一种逻辑功能划分，实际实现时可以有另外的划分方式，例如多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统，或一些特征可以忽略，或不执行。另一点，所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通信连接可以是通过一些接口，单元或模块的间接耦合或通信连接，可以是电性或其它的形式。

作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的，作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元，即可以位于一个地方，或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元来实现本实施例方案的目的。

另外，在本发明各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理单元中，也可以是各个单元单独物理存在，也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中。上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能单元的形式实现。

以上仅是本发明的优选实施方式，应当指出，对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明原理的前提下，还可以做出若干改进和润饰，这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

工业实用性：

如上所述，本发明实施例提供的一种平坦度的补偿方法和装置、存储介质和电子设备具有以下有益效果：通过对基带信号进行过采样的过程中，能够获取到更多的基带信号的信息，然后根据这些信息按照上述方式一步步确定出滤波器抽头系数，能够

使得到的滤波器抽头系数更加精确，最终，根据该滤波器抽头系数生成目标滤波器，并使用目标滤波器来对基带信号进行补偿，提高了对基带信号的补偿效果。