Предмет изобретения

Настоящее изобретение, как следует из его названия, относится к способу передискретизации цифрового сигнала при передаче и приеме со сдвигом спектра цифрового сигнала, позволяющему осуществлять коррекцию ошибки частоты, вносимой цифроаналоговыми и аналого-цифровыми преобразователями, используемыми в системах дальней связи.

Предлагаемый в изобретении способ позволяет упростить электронное оборудование, необходимое для осуществления передискретизации полосовых сигналов.

Предпосылки создания изобретения

В большинстве систем дальней связи переданный сигнал на приеме подвергают передискретизации посредством аналого-цифрового преобразователя с использованием постоянной во времени частоты дискретизации. Поскольку эта частота дискретизации не совпадает в точности с частотой дискретизации, использовавшейся при передаче, необходимо интерполировать принятый сигнал, чтобы получить те его отсчеты, которые были бы приняты в случае совпадения двух вышеупомянутых частот, что позволило бы точно демодулировать ранее переданные данные.

Gardner в статье "Interpolation in Digital Modems: Part I: Fundamentals. IEEE Transactions on Communications", том 41, № 6, июнь 1993г. изложил основы временной синхронизации с использованием методов интерполяции, а в статье "Interpolation in Digital Modems: Part II: Implementation and Performance. IEEE Transactions on Communications", том 41, № 6, июнь 1993 г. провел исследование применения цифровых фильтров в качестве интерполяторов.

Структура интерполяции, описанная в названных материалах, имеет ряд недостатков. Среди основных недостатков можно выделить чрезмерную сложность и огромные размеры фильтров-интерполяторов, необходимых для передискретизации полосовых сигналов. Другой недостаток заключается в том, что рабочая частота фильтров настолько высока, что их аппаратурное оформление обходится весьма дорого.

В настоящем изобретении предлагается изменение структуры интерполяции с целью облегчения ее реализации, уменьшая сложность фильтров, а также их рабочую частоту. При этом передискретизацию осуществляют не только при приеме, но и при передаче.

Следует отметить, что при описании настоящего изобретения используется сокращение CORDIC (поворот координат при цифровых вычислениях, от англ. "Coordinate Rotation Digital Computer"), которое относится к алгоритму расчета математических функций, оптимизированных для их физической реализации. Такой алгоритм известен из уровня техники, и его описание не включено в настоящий документ. Для обозначения цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей также используются сокращения ЦАП и АЦП, а сокращение ОЧУ означает ортогональное частотное уплотнение (в англ. литературе "OFDM").

Описание изобретения

Для решения задач и преодоления недостатков, названных выше, в изобретении предлагается способ передискретизации цифрового сигнала при передаче и приеме со сдвигом спектра цифрового сигнала, включающий по выбору обработку сигнала при передаче, при приеме или в обоих случаях.

При приеме сигнала обработка заключается в дискретизации сигнала посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП), переносе частоты и обработке сигнала во временной области. С учетом того, что большинство каналов связи представляют собой полосовые каналы, информацию передают в полосе пропускания таким образом, что при приеме после прохождения через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) цифровой сигнал переносят в основную (рабочую) полосу частот (baseband). В изобретении предусмотрено, что при приеме корректируют частоту сдвига спектра цифрового сигнала в ходе преобразования частоты сигнала с переносом в основную полосу частот, после чего сигнал прореживают с уменьшением частоты дискретизации и исключением копий. После прореживания сигнала в основной полосе частот осуществляют его передискретизацию с получением требуемых отсчетов.

Обработку сигнала при приеме после передискретизации осуществляют непрерывно, а блоки, расположенные после блока передискретизации, должны быть способны компенсировать отклонения, или колебания, частоты сигнала на выходе блока передискретизации, для чего задают избыточные параметры аппаратных средств.

Обрабатывая сигнал при передаче (на передающем конце линии связи), сигнал в основной полосе частот (модулирующий сигнал) подвергают передискретизации. После передискретизации сигнал интерполируют с повышением частоты дискретизации. Затем осуществляют преобразование сигнала по частоте с получением полосового сигнала, который подают на вход в цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), преобразующий сигнал в аналоговый сигнал для передачи. При выполнении преобразования частоты в изобретении предусмотрена коррекция частоты сдвига спектра цифрового сигнала.

Поскольку число отсчетов (выборок) на выходе блока передискретизации при передаче является переменным во времени, за блоком передискретизации включена память, ответственная за сохранение любых отсчетов на выходе блока передискретизации и подачу этих отсчетов в блок интерполяции в фиксированном ритме. Иными словами, скорость ввода отсчетов в память является переменной, а скорость их считывания из памяти - постоянной.

С целью обеспечения устойчивой работы памяти при передаче в отсутствие передачи или при передаче нолей указателям чтения и записи возвращают их начальные значения.

Кроме того, если при передаче скорость записи выше скорости считывания, считывание начинают немедленно после осуществления первой записи в память.

Если же скорость считывания превышает скорость записи, то до начала считывания в память записывают определенное число отсчетов, которое определяют на основе используемого коэффициента передискретизации и длительности передачи.

Размер памяти рассчитывают, исходя из максимального времени передачи и максимального коэффициента передискретизации таким образом, чтобы исключить потерю любого введенного в память отсчета.

Кроме того, чтобы осуществить перенос сигнала из полосы пропускания в основную полосу частот при приеме и из основной полосы частот в полосу пропускания при передаче, необходимо вычислять по меньшей мере один синус и один косинус, для чего используется алгоритм CORDIC.

В одном из вариантов осуществления изобретения для упрощения блока передискретизации сигнал как при передаче, так и при приеме интерполируют при помощи целого числа, до подачи сигнала на вход блока передискретизации, на выходе которого отсчеты сигнала прореживают с использованием того же коэффициента.

Среди наиболее важных преимуществ настоящего изобретения следует выделить следующие: упрощение структуры фильтров, необходимых для передискретизации полосового сигнала, а также снижение рабочей частоты фильтров, способствующее их аппаратурному оформлению, возможность осуществления передискретизации при передаче, а не только при приеме, а также то, что благодаря возможности использования в предлагаемом в изобретении способе алгоритма CORDIC, перенос частоты (преобразование сигнала по частоте) реализуется с высокой гибкостью, когда речь идет о помещении сигнала (его спектра) в интересующую полосу частот.

Для облегчения понимания данного описания оно сопровождается чертежами, являющимися его неотъемлемой частью и поясняющими сущность изобретения, не исчерпывая при этом возможностей его осуществления.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 схематически представлена блок-схема передискретизации при приеме,

на фиг. 2 - блок-схема передискретизации при передаче,

на фиг. 3 - память с указателями чтения и записи, расположенная на приеме после блока передискретизации,

на фиг. 4 - реализация блока передискретизации с функцией интерполяции и прореживания.

Описание варианта осуществления изобретения

Далее со ссылкой на ссылочные номера, приведенные на чертежах, рассматривается один из вариантов осуществления изобретения.

В большинстве систем связи передачу сигнала осуществляют в полосе пропускания, иными словами, сигнал занимает определенный диапазон частот, в который не входит нулевая частота. Для облегчения реализации электронной аппаратуры, необходимой для передачи и приема сигнала, такой сигнал подвергают внутренней обработке в основной полосе частот, т.е. в диапазоне частот, включающем нулевую частоту, а затем при передаче переносят в полосу пропускания. На принимающем конце этот процесс осуществляют в обратной последовательности.

Кроме того, в системах цифровой связи между ЦАП и АЦП, используемыми при передаче и приеме соответственно, всегда существует рассогласование по частоте дискретизации, т.е. ошибка или отклонение частоты. Если такая ошибка превышает значение, предельно допустимое в системе дальней связи, в которой она имеет место, необходима коррекция, и одним из подходящих для этого способов является передискретизация (ресамплинг), которая заключается в том, что используя последовательность отсчетов, полученных в определенные моменты времени, получают отсчеты, соответствующие другим моментам времени. Процесс передискретизации при приеме согласно данному варианту осуществления проиллюстрирован на фиг. 1 на примере группы блоков 25.

Поскольку при такой передискретизации обычно непосредственно используют полосовой сигнал после дискретизации принятого сигнала посредством АЦП 1, т.е. используют непосредственно блок 6 передискретизации, применяемое электронное оборудование должно работать на той же частоте, которую генерирует генератор 2 АЦП, а фильтры передискретизации должны иметь достаточную полосу пропускания, чтобы не искажать сигнал. В предлагаемом в изобретении способе для передискретизации сигнала вместо блока 6 передискретизации применяют группу блоков 25 с достижением описанных выше преимуществ. При передаче этот процесс проводят аналогично, за исключением того, что для передискретизации в соответствии с изобретением обычно используемый блок 16 передискретизации заменяют группой блоков 26.

В случае полосовых сигналов параметры системы являются избыточными, поскольку она работает на гораздо более высоких частотах, чем частоты, которые использовались бы при работе в основной полосе частот, т.е. при прямой передаче сигнала. Таким образом, при приеме лучше переносить сигнал в

основную полосу посредством блока 4 сдвига спектра сигнала, расположенного сразу же за АЦП 1. В данном варианте осуществления блок 4 соответствует двум умножителям, один из которых умножает сигнал на синусоидальный сигнал, а другой - на косинусоидальный сигнал. Как описано далее, при приеме также используют блок 20 сдвига спектра сигнала, который реализован аналогичным образом, но имеет дополнительный сумматор. Такое преобразование по частоте (перенос частоты) не является фиксированным, поскольку зависит от рассогласования преобразователей, в связи с чем в процесс преобразования по частоте необходимо вносить поправки в соответствии с устраняемым рассогласованием. После переноса частоты осуществляют прореживание 5 сигнала с использованием целочисленного коэффициента N, чтобы снизить частоту дискретизации на выходе дециматора и исключить копии, которые появляются при переносе частоты, после чего осуществляют передискретизацию сигнала. Блок 6 передискретизации известен из уровня техники и может быть реализован различными способами, например, описанными во второй части статьи, приведенной в качестве ссылки. За счет работы на более низкой частоте и за счет того, что она зависит от коэффициента прореживания N, упрощается конструкция и реализация фильтров передискретизации. На фиг. 1 также показан блок 7, который отвечает за определение вносимой поправки по частоте и, как пояснялось выше, влияет на перенос спектра сигнала в основную полосу частот, изменяя частоту переноса в основную полосу посредством алгоритма CORDIC 3, а также влияет на блок 6 передискретизации, который, как указано выше, известен из уровня техники, и на выход которого поступают цифровые отсчеты, как если бы аналоговый сигнал, эквивалентный цифровому сигналу на его входе, подвергли дискретизации с частотой, отличающейся от частоты дискретизации сигнала на его входе.

Частота появления отсчетов на выходе блока 6 передискретизации отличается от частоты поступления отсчетов на вход на внесенную поправку 7, а блоки обработки сигнала, первым из которых является демодулятор 8, расположенный после блока передискретизации, должны быть способны компенсировать такое отклонение. Это в особенности важно, если обработку сигналов вообще нельзя прекратить, как в случае блока синхронизации, поскольку частота появления отсчетов может незначительно превышать рабочую частоту генератора синхроимпульсов, который применяют в таких блоках синхронизации, что вынуждает выполнять блоки синхронизации с избыточными параметрами. В других случаях обработка не является непрерывной, как при реализации дискретного преобразования Фурье (ДПФ), которое применяют при демодуляции ОЧУ-сигнала, и отклонение частоты компенсируют без серьезных последствий. Если частота появления отсчетов на выходе блока передискретизации ниже частоты на его входе, то остановка демодулятора 8 не повлечет за собой проблем при отсутствии на его входе соответствующих отсчетов.

Передискретизацию сигнала также осуществляют при передаче таким образом, чтобы в приемное устройство поступали такие же отсчеты, которые поступали бы в него, если бы передискретизацию осуществляло само приемное устройство. Передискретизацию также можно выполнять одновременно при передаче и приеме таким образом, чтобы на обоих концах линии связи корректировать рассогласование по частоте, внесенное преобразователями.

Передискретизацию при передаче осуществляют, как это проиллюстрировано на фиг. 2, на которой показано, что передаваемые отсчеты поступают из модулятора 9 в блок 16 передискретизации. Затем сигнал интерполируют 10 при помощи целочисленного коэффициента N с повышением частоты дискретизации, а уже упомянутый выше блок 20 сдвига спектра сигнала переносит сигнал в полосу пропускания. Наконец, отсчеты полосового сигнала поступают в ЦАП 11. Блок 17 коррекции передачи определяет коррекцию, вводимую в устройство передискретизации и устройство переноса полосы, аналогично тому, как это делается при приеме. Кроме того, на фиг. 2 также показан блок 19, представляющий собой генератор, который задает частоту ЦАП, и блок 18, представляющий собой схему CORDIC. В другом варианте осуществления изобретения, когда передачу и прием осуществляют в различные периоды времени, иными словами, осуществляют временное разделение канала, некоторые блоки системы могут использоваться повторно, например в качестве устройств 3 и 18 может использоваться один блок CORDIC, в качестве устройств 4 и 20 - один блок сдвига спектра сигнала, в качестве устройств 6 и 16 - один блок передискретизации, в качестве устройств 7 и 17 - один блок коррекции, а в качестве устройств 19 и 2 - один генератор, при этом работу блоков адаптируют к периодам передачи и приема сигналов.

На фиг. 2 также показана память, или запоминающее устройство, 12, в которую записывают отсчеты, появляющиеся на выходе блока передискретизации, и из которой их считывает интерполятор. Обе операции осуществляют посредством указателей 13 и 14 кольцевой памяти, иными словами, по достижении последней ячейки памяти происходит возврат к первой ячейке. Назначение такой памяти заключается в том, чтобы компенсировать или "поглощать" разность скоростей появления отсчетов на выходе блока передискретизации и ввода отсчетов в интерполятор.

В большинстве систем связи имеют место перерывы в передаче, поскольку периодически необходимо осуществлять ресинхронизацию, оценку канала и т.д. Такие перерывы могут использоваться для очистки содержимого памяти и повторной инициализации указателей. После очистки памяти и до того, как она снова начнет работать, можно передавать ноли.

При передискретизации на передаче, как и на приеме, могут иметь место две ситуации в зависимо-

сти от знака вводимой поправки. Иногда частота дискретизации при приеме оказывается ниже частоты при передаче, в связи с чем при передискретизации при передаче необходимо генерировать большее число отсчетов, чем число отсчетов, поступающих на вход. В этом случае скорость записи в память превышает скорость считывания и, следовательно, считывание можно осуществлять немедленно после первой записи.

В других случаях частота дискретизации при приеме больше частоты при передаче, т.е. запись отсчетов в память при передискретизации при передаче происходит медленнее их считывания, и в этом случае ожидают, когда указатель 14 записи достигнет заданного положения, после чего начинают считывание. Данную величину вычисляет блок 17 коррекции на основе введенной коррекции и длительности передачи. В качестве другого менее предпочтительного варианта ожидают, пока память заполнится, после чего начинают считывание.

В обоих случаях именно блок 17 определяет порядок работы памяти в зависимости от вводимой коррекции, как это показано на фиг. 2.

На фиг. 3 представлена память и указатели чтения и записи. Чтобы указатель 13 чтения ни при каких обстоятельствах не опережал указатель 14 записи, емкость памяти должна быть рассчитана на основе максимальной длительности передачи и максимального корректирующего воздействия.

Для переноса сигнала в другой диапазон с использованием блока 4 и 20 сдвига спектра сигнала необходимо генерировать синусоиду и косинусоиду определенной частоты. Учитывая то, что предлагаемый способ предусматривает регулировку, коррекцию этой частоты сдвига спектра, необходимо использовать эффективный алгоритм вычисления синуса и косинуса переменных углов, поскольку коррекцию частоты выполняют путем изменения приращения угла, добавляемого к каждому отсчету. С этой целью алгоритм CORDIC позволяет вычислить синус и косинус любого угла. Для выполнения сдвига спектра сигнала по частоте (переноса частоты) блоки 4 или 20 умножают отсчеты сигнала на синус и косинус определенного угла. Этот угол в каждом отсчете увеличивается по модулю на 360°, и коррекция частоты сдвига спектра достигается именно путем изменения (варьирования) этого приращения угла, осуществляемого блоком 7 или 17 коррекции.

Фильтры передискретизации как на передаче, так и на приеме должны иметь достаточную полосу пропускания, чтобы не искажать сигнал и не влиять на качество связи. В зависимости от ширины полосы частот сигнала и частоты дискретизации может оказаться, что реализация таких фильтров чрезмерно сложна с точки зрения числа операций или даже что невозможно создать отвечающий требованиям фильтр. Кроме того, в большинстве систем связи необходимо, чтобы при передаче символа сигнал не претерпевал изменений, что особенно важно в системах связи с использованием ОЧУ-модуляции. В рассматриваемом варианте осуществления характеристика фильтров передискретизации слегка колеблется от отсчета к отсчету из-за фактической интерполяции, при этом такое колебание более существенно на частотах, близких к полосе заграждения фильтра, что может сказаться на сигнале с такими частотами. Как показано на фиг. 4 и описано выше, более предпочтительным при передаче и приеме было бы осуществлять интерполяцию с использованием фиксированного коэффициента M 22 до осуществления передискретизации 23, а затем осуществлять прореживание с использованием коэффициента M 24. Блоки 6 и 16 передискретизации могут быть заменены устройством, состоящим из интерполятора 22, блока 23 передискретизации и дециматора 24, которое показано на фиг. 4. При этом максимальную дискретную частоту сигнала делят на M, а требования к фильтру передискретизации упрощаются, хотя он и должен работать на частоте, которая в M раз выше. Одно из преимуществ такого решения состоит в том, что кратное M прореживание после передискретизации заключается лишь в том, что берут один из каждых M отсчетов, поскольку в сигнале отсутствуют подлежащие отфильтровыванию копии (реплики), т.е. не требуются дополнительные вычисления. Кроме того, не требуется осуществлять расчет исключенных отсчетов, что позволяет упростить реализацию блока 6, 16 или 23 передискретизации, как это показано на фиг. 4 на примере блока 15, в котором объединены блок передискретизации и дециматор. За счет упрощения фильтра передискретизации обеспечивают оптимальное с точки зрения числа осуществляемых операций решение, благодаря применению описанной структуры с использованием интерполяции и передискретизации вместо структуры с использованием непосредственной передискретизации.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ передискретизации цифрового сигнала при передаче и приеме со сдвигом спектра цифрового сигнала, включающий при передаче обработку сигнала во временной области, перенос частоты и преобразование цифрового сигнала в аналоговый посредством цифроаналогового преобразователя (ЦАП), а при приеме - дискретизацию сигнала посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сдвиг спектра сигнала и обработку сигнала во временной области, отличающийся тем, что по выбору выполняют

обработку сигнала при передаче, в процессе которой сигнал в основной полосе частот подвергают передискретизации с получением требуемых отсчетов, отсчеты сигнала на выходе блока передискретизации вводят в память, скорость записи в которую является переменной, а скорость считывания - посто-

янной, интерполируют сигнал с повышением частоты дискретизации и корректируют частоту сдвига спектра цифрового сигнала, либо

обработку сигнала при приеме, в процессе которой корректируют частоту сдвига спектра цифрового сигнала, прореживают сигнал с уменьшением частоты дискретизации и исключением копий, сигнал в основной полосе частот подвергают передискретизации с получением требуемых отсчетов, а отклонения частоты появления отсчетов на выходе блока передискретизации компенсируют за счет использования в непрерывным режиме аппаратных средств приемного устройства с избыточными параметрами, либо

обработку сигнала как при передаче, так и при приеме в сочетании друг с другом.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что в отсутствие передачи или при передаче пакета нолей по выбору выполняют повторную инициализацию указателей записи в память и чтения из памяти.

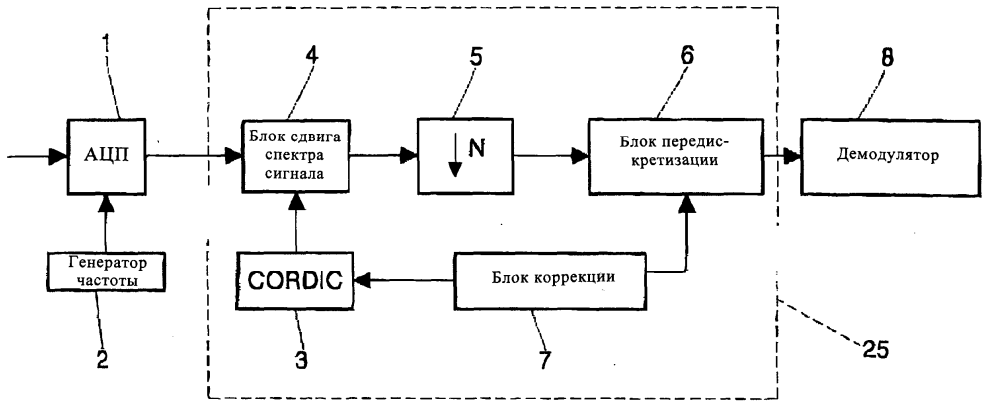
3. Способ по п.1, отличающийся тем, что если при передаче скорость записи выше скорости считывания, считывание начинают немедленно после осуществления первой записи в память.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что если при передаче скорость записи ниже скорости считывания, до начала считывания в память записывают определенное число отсчетов, которое определяют на основе используемого коэффициента передискретизации и длительности передачи.

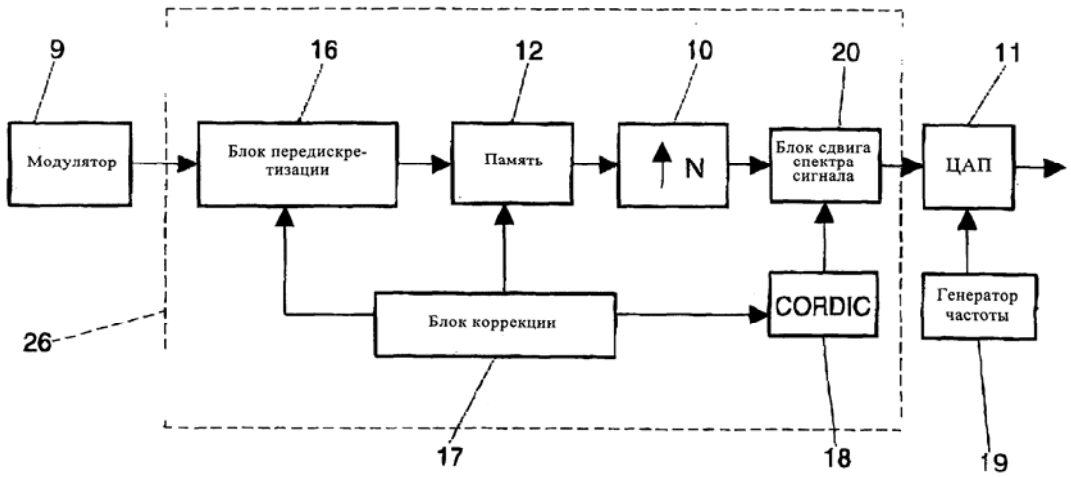
5. Способ по п.1, отличающийся тем, что емкость памяти рассчитывают на основе максимального времени передачи и максимального коэффициента передискретизации.

6. Способ по п.1, в котором для смещения спектра цифрового сигнала необходимо вычислять по меньшей мере один синус и один косинус, отличающийся тем, что такое вычисление осуществляют посредством алгоритма CORDIC (поворот координат при цифровых вычислениях).

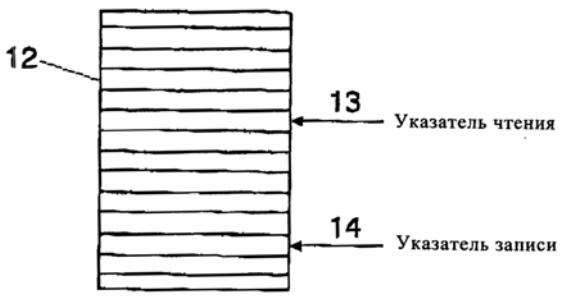
7. Способ по п.1, отличающийся тем, что интерполяцию сигнала выполняют при помощи целого числа M, заданного перед блоком передискретизации, на выходе которого сигнал прореживают с использованием того же коэффициента.



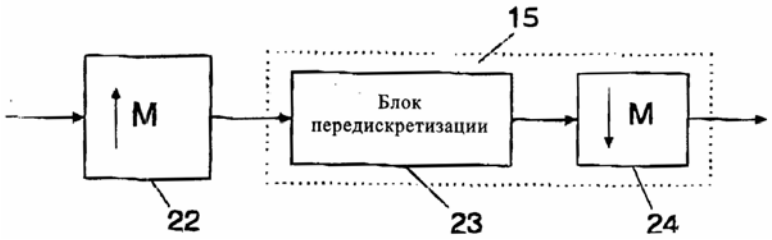
Фиг. 1



Фиг. 2


12
13
Указатель чтения
14
Указатель записи

Фиг. 3


15
M
Блок
передискретизации
M
22
23
24

Фиг. 4