

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.396

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-77-85

Структура цифрового радиоприемного устройства с фотонным аналого-цифровым преобразователем*

А. Е. Денисов, аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

Д. П. Данилаев, доктор технических наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

Статья посвящена определению требований к предварительной, аналоговой части приемника и его структуре при использовании фотонного аналого-цифрового преобразователя. Предметом исследования при этом является вопрос обеспечения большого динамического диапазона сигналов на входе приемника с фотонным аналого-цифровым преобразователем.

Исследованы параметры и свойства фотонного аналого-цифрового преобразователя с оптическим квантованием и дискретизацией. Отличительными особенностями фотонного аналого-цифрового преобразователя является высокая частота дискретизации (порядка 100 ГГц), возможности увеличения отношения несущей к шуму и эффективного числа бит за счет усиления несущей или модулирующего сигнала и низкий коэффициент шума радиофотонных элементов. Представленные преимущества позволяют уменьшить структуру аналоговой части приемника за счет устранения смесителя и антиалайзингового фильтра, а также добиться лучшей чувствительности из-за меньшего уровня внутренних шумов.

В ходе исследования также выявлено ограничение динамического диапазона, накладываемое радиофотонной элементной базой. Причиной ограничения является нелинейность используемых электрооптических модуляторов и ограничение верхней границы динамического диапазона применяемыми фотоприемниками. Всё это приводит к требованиям, при которых аналоговой частью должно обеспечиваться значительное усиление принятого радиосигнала, а также реализация изменяемого коэффициента усиления.

В результате представлены структурные решения в виде многоканальных схем с переключением. Принцип работы заключается в том, что каждый канал, состоящий из каскада линейных усилителей и фотонного аналого-цифрового преобразователя, имеет различный коэффициент усиления, а в блоке цифровой обработки производится сравнение и переключение каналов в зависимости от уровня сигнала. При этом уровень должен находиться в коридоре допустимых для применения фотонного аналого-цифрового преобразователя значений и в рамках динамического диапазона.

Представленные структурные решения позволяют реализовать радиоприемные устройства, способные принимать и обрабатывать сигнал СВЧ-диапазона без переноса сигнала на промежуточную частоту. При этом может быть достигнут требуемый уровень усиления сигнала в $10^5 \dots 10^6$, позволяющий добиться уровня сигнала в 2,5...9,5 В, при котором фотонный аналого-цифровой преобразователь имеет наилучшие показатели CNR и ENOB.

Ключевые слова: радиофотонный аналого-цифровой преобразователь, динамический диапазон, отношение несущей к шуму, эффективное число бит, многоканальная структура.

Введение

Благодаря цифровой обработке сигналов в радиоприемных устройствах обеспечивается расширение их функционала, большая адаптивность к условиям приема, возможность уменьшить аналоговую часть с расположением аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ближе к входу [1]. АЦП является первым

цифровым блоком в структуре радиоприемного устройства. Принцип действия АЦП, его структура и параметры имеют существенное значение для характеристик и конфигурации проектируемого радиоприемника [2]. Его влияние на структуру и параметры приемника обусловлено основными характеристиками, такими как разрядность и частота дискретизации, а также высоким

© Денисов А. Е., Данилаев Д. П., 2023

* Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по соглашению № 1022041100774-3/1022041100496-8 от 03.06.2022.

уровнем собственных шумов, в том числе специфических [3]. Быстро развивающаяся область радиофотоники предлагает решения по улучшению характеристик АЦП за счет использования новых физических принципов, преодоления физического и технологического предела, достигнутых транзисторной электроникой [4–7]. Для реализации радиоприемных устройств потенциальными преимуществами от применения фотонных АЦП могут стать: расширение частотного диапазона, обработка сигналов в гигагерцевом диапазоне, выигрыши по шумам и др.

Однако переход в оптическую область приводит к появлению ограничений, связанных с динамическим диапазоном. Необходимо отметить, что применение электронных АЦП в приемниках приводит к ограничениям по минимальному и максимальному сигналу на его входе, а значит, и на входе приемника. Переход к радиофотонным схемам усугубляет эту проблему. С одной стороны, это связано с модуляторами, используемыми в линии связи, которые из-за своей нелинейности при относительно больших уровнях сигналов могут вносить гармонические, кросс-модуляционные, интермодуляционные искажения [8]; с другой – слабый уровень сигнала, принятого на уровне чувствительности приемника, оказывается недостаточным для входа фотонного АЦП.

Обеспечение режима работы фотонного АЦП возможно за счет доработки предварительной аналоговой части приемника.

Целью работы является определение требований к предварительной аналоговой части приемника и его структуре при использовании фотонного АЦП.

Предметом исследования при этом являются вопросы обеспечения большого динамического диапазона сигналов на входе приемника с фотонным АЦП.

Особенности фотонных АЦП (ФАЦП)

Использование оптических средств для аналого-цифрового преобразования интересно тем, что позволяет добиться:

- высокой стабильности временных характеристик с помощью лазерных источников света;
- возможности коммутации оптического сигнала в параллельно работающие дискретные каналы;
- специфических возможностей манипуляции временными характеристиками оптического сигнала;
- помехозащищенности оптических каналов;
- модуляции оптического сигнала в широкой полосе частот.

Данные преимущества оптической элементной базы позволяют получить [9, 10]:

- фотонные АЦП с частотой дискретизации более 100 ГГц и джиттером порядка 3 пс;
- лучшую, чем у электронных АЦП, чувствительность и полосу пропускания.

Это, в свою очередь, позволяет реализовать всеволновые радиоприемные устройства со сверхширокой полосой пропускания при сохранении точности воспроизведения сигнала за счет меньшего коэффициента шума [11, 12].

Фотонные АЦП можно разделить на два вида по способу построения. В гибридных АЦП оптическая часть устанавливается перед электронным АЦП и реализует одну из функций – квантование или дискретизацию. Ко вторым относятся АЦП, полностью построенные на радиофотонной элементной базе. Из-за использования электронных АЦП в первом варианте остаются характерные для них фундаментальные ограничения, определяемые апертурной ошибкой и неопределенностью компараторов. В связи с этим для дальнейшего исследования рассматриваются преобразователи второго вида.

Для определения требований к структуре приемника необходимо указать на особенности и преимущества использования фотонного АЦП. Имеются различные структурные варианты построения преобразователей. Однако в данной работе будет рассмотрена наиболее простая и распространенная структура, которая включает: лазер, работающий в режиме синхронизации мод; модуляторы Маха – Цендера (ММЦ); фотодиоды и компараторы (рис. 1).

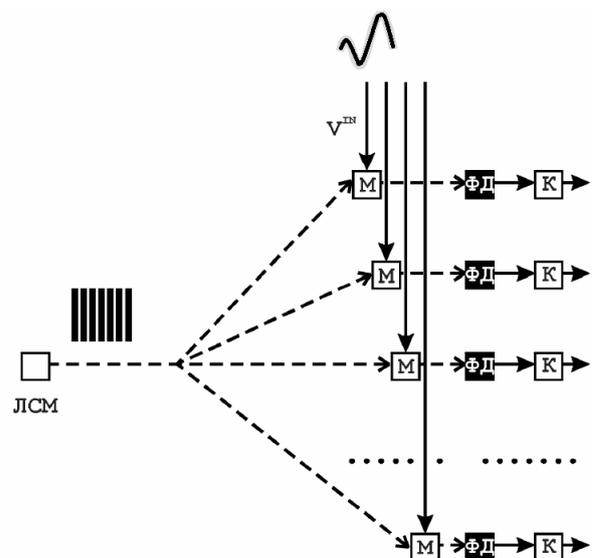


Рис. 1. Структура фотонного АЦП [13]

Fig. 1. Structure of the photonic ADC [13]

Исходя из имеющихся оценок параметров выбранного фотонного АЦП (см. рис. 1) можно ожидать некоторые структурные особенности приемников на его основе.

1. Высокая частота дискретизации 100 ГГц позволяет работать с сигналами до 50 ГГц без переноса на низкую промежуточную частоту. Таким образом, можно исключить использование смесителя, что позволяет избавиться от элемента с большим уровнем собственных шумов и предотвратить появление комбинационных частот.

2. Достижимая в ФАЦП частота дискретизации приводит к расширению зон Найквиста, свойственных для всех АЦП. Тогда появляется возможность убрать из структуры приемника антиаллазинговый фильтр.

3. При достижении условий, когда RIN -шум становится незначительным ($RIN = 0$, $R = 1$ А/Вт, $R_L = 50$ Ом, $F_n = 1$, $T = 300$, $I_d = 0$, $m = 0,5$, где RIN – эффективный шум относительной интенсивности оптического источника, R – чувствительность фотодиода, R_L – эквивалентное сопротивление нагрузки фотодиода, F_n – коэффициент шума усилителя, T – температура, I_d – темновой ток детектора, m – глубина модуляции электрооптического модулятора), появляется возможность увеличить отношение несущей к шуму (CNR) за счет увеличения средней оптической мощности на фотодиоде:

$$CNR = \frac{(mP)^2 / 2}{\left((2qP\Delta f) + \left(\frac{4k_b T \Delta f}{R_L} \right) \right)}, \quad (1)$$

где P – средняя оптическая мощность на фотодиоде; q – заряд электрона.

Однако при реальных условиях, когда RIN принимает не нулевое значение, то RIN -шум доминирует над производительностью системы, поскольку увеличивается квадратично с увеличением мощности. Фактически CNR становится независимым от принимаемой оптической мощности [14]. В связи с этим CNR определяется следующим образом:

$$CNR \approx \frac{m^2}{4RIN\Delta f}. \quad (2)$$

В логарифмическом виде выражение (2) имеет вид

$$CNR[\text{дБ}] = 20 \lg(m) - 10 \lg[\Delta f (\text{МГц})] - RIN \left(\frac{\text{дБ}}{\text{Гц}} \right) - 63, \quad (3)$$

где величина 63 в правой части формулы представляет собой результат суммирования 3 дБ, обозначающий логарифмическое представление числа 2 и поправки к величине относительной интенсивности шумов, имеющей величину 60 дБ.

Индекс оптической модуляции m можно определить как

$$m = \frac{\sqrt{2} U_{\text{эфф}} K E}{P_{\text{опт}} R_0}, \quad (4)$$

где $U_{\text{эфф}}$ – среднеквадратичное (эффективное) входное напряжение лазерной цепи с входным сопротивлением R_0 ; K – коэффициент согласования; E – эффективность лазерной крутизны; $P_{\text{опт}}$ – усредненная выходная оптическая мощность лазера.

Из этого следует, что m прямо пропорционален входному напряжению, то есть разным уровням входных управляющих напряжений будут соответствовать разные значения m .

Вследствие этого можно утверждать, что увеличение входного модулирующего напряжения будет вызывать увеличение индекса модуляции (4), тем самым увеличивая значение CNR (3) (рис. 2), поскольку зависимость CNR от индекса модуляции носит логарифмический характер.

4. Увеличение отношения несущей к шуму приводит к увеличению эффективного числа бит ($ENOB$), поскольку имеется следующее отношение:

$$ENOB = (CNR - 1,76) / 6,02. \quad (5)$$

Таким образом, появляется теоретическая возможность получить $ENOB$ близкий к разрядности ФАЦП, реализуемой в устройствах с выбранной структурой (см. рис. 1).

5. Коэффициент шумоприемного устройства фактически определяет основной параметр приемника – статическую чувствительность. При этом АЦП имеют наибольший коэффициент шума в отличие от других элементов аналогового тракта. Чтобы избежать влияния АЦП на общий коэффициент шума приемника, его располагают как можно дальше от входа.

В настоящее время данный параметр мало исследован для фотонных АЦП. Однако в работе [15] представлено исследование волоконно-оптической линии, состоящей из лазерного диода с распределенной обратной связью, оптического волокна с сохранением поляризации, одномодового оптического волокна, электрооптического модулятора Маха – Цендера, усилителя на легированном эрбием волокне и мощного

фотодиода. Данная структура аналогична структуре выбранного ФАЦП за исключением наличия оптического волокна и усилителя. Несмотря

на это, при значении RIN -шума в -160 дБн/Гц можно получить коэффициент шума системы менее 30 дБ.

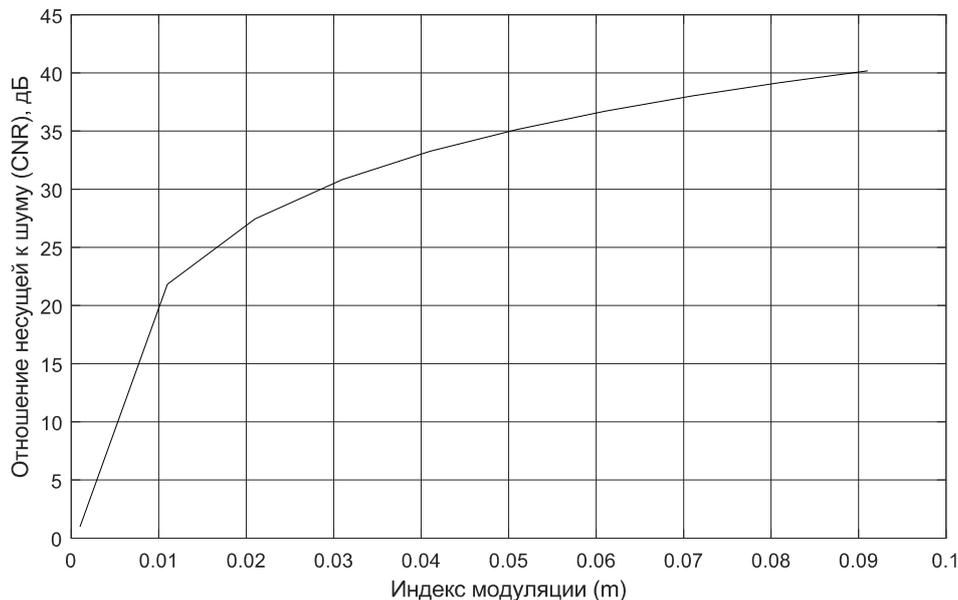


Рис. 2. Зависимость CNR от индекса модуляции

Fig. 2. Dependence of the SNR on the modulation index

Аналогичное значение коэффициента шума (30...40 дБ) [16] свойственно электронным АЦП. Однако известная структура и возможность повлиять на процессы внутри ФАЦП позволяют снизить коэффициент шума. Например, повышая квантовую эффективность регистрации и уменьшая интенсивность темновых импульсов, можно уменьшить коэффициент шума фотоприемников [17].

Ограничения динамического диапазона

Использование радиотонных схем имеет как положительное, так и отрицательное влияние на динамический диапазон радиоприемника. Положительным является меньший коэффициент собственных шумов радиотонных элементов, позволяющий улучшить чувствительность и тем

самым уменьшить нижнюю границу динамического диапазона устройства.

Однако радиотонные элементы также приводят и к уменьшению динамического диапазона. Например, проводя сравнение фотонных АЦП с электронными можно выделить значительное отличие, связанное с интермодуляционными искажениями.

В электронных АЦП возникновение интермодуляционных искажений возможно только при достижении полной шкалы. Иная ситуация происходит в фотонных АЦП. Связано это с использованием электрооптических модуляторов, в нашем случае – модуляторов Маха – Цендера, которые имеют нелинейную передаточную характеристику (рис. 3).

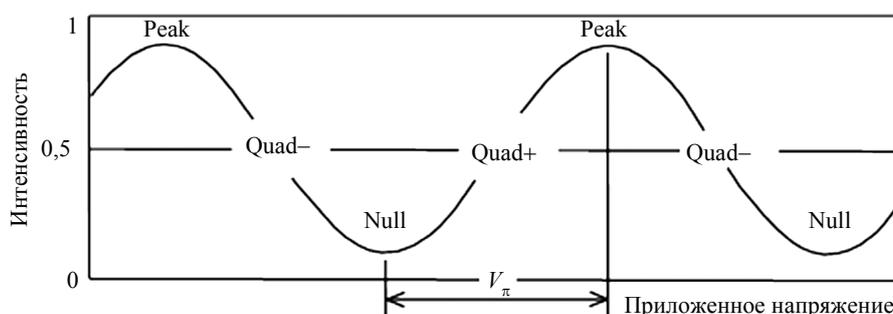


Рис. 3. Передаточная характеристика ММЦ

Fig. 3. Transfer characteristic of MMC

Таким образом, принимая сигнал, значение которого выходит за пределы линейного участка передаточной характеристики ММЦ, появляются интермодуляционные искажения, уменьшающие динамический диапазон всего приемника.

Для достижения наилучших показателей отношения несущей к шуму и *ENOB* требуется значительно усиливать сигнал, то есть держать уровень сигнала вблизи верхней границы динамического диапазона. Однако согласно [18] динамический диапазон системы зависит от динамического диапазона фотоприемника. Он, в свою очередь, ограничивается насыщением фотоприемника при накоплении заряда под воздействием излучения и определяется как

$$DR_{\text{ФП}} = 20 \log \left(\frac{Q_{\text{max}} (\sqrt{2} - 1)}{Q_{S_{\text{min}}}} \right), \quad (6)$$

где Q_{max} – максимальный заряд ячейки; $Q_{S_{\text{min}}}$ – минимальный накопленный заряд.

Также при типовых параметрах фотоприемника $Q_{\text{max}} = 10^5$, и если $Q_{S_{\text{min}}}$ – шумы электрических схем $\sigma_q^2 = 2 \cdot 10^2$, динамический диапазон принимает значение в 40 дБ.

Зависимость динамического диапазона фотоприемника от Q_{max} согласно (6) можно представить в виде, показанном на рисунке 4.

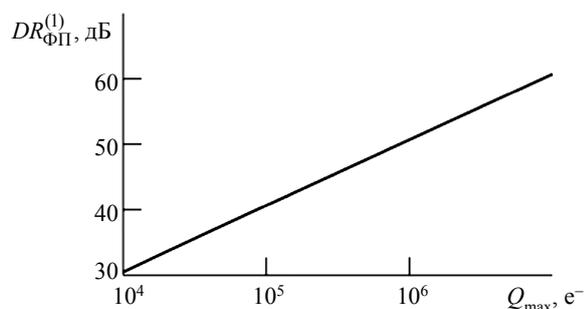


Рис. 4. Зависимость односигнального динамического диапазона от заряда насыщения фотоприемника

Fig. 4. Dependence of the single-signal dynamic range on the saturation charge of the photodetector

Аналогичное значение соответствует 6...7-разрядному электронному АЦП при расчете динамического диапазона по формуле

$$DR = 6,021N + 1,763, \quad (7)$$

где N – количество разрядов АЦП.

При этом могут возникнуть ситуации, при которых либо сам сигнал принимает значения,

во многом превышающие динамический диапазон приемника (ФАЦП), либо имеется внеполосная помеха, превышающая уровень необходимого сигнала.

Таким образом, при использовании ФАЦП необходимо применять решения, которые позволят избежать ограничений динамического диапазона.

Требования к структуре приемника

Для снятия ограничений динамического диапазона, вызванных особенностями использования ФАЦП, нужно определить требования к предварительной аналоговой части приемника и его структуре при использовании фотонного АЦП.

1. Для ММЦ, используемых в структуре ФАЦП, уровень модулирующего сигнала должен принимать значения в соответствии с уровнем полуволнового напряжения. Значение полуволнового напряжения обычно находится в диапазоне 2,5...9,5 В [19], поэтому коэффициент усиления аналоговой части, при уровне принятого сигнала, измеряемого в микровольтах, должен быть порядка $10^5 \dots 10^6$. При этом коэффициент усиления (по мощности) в 100...120 дБ при условии малого коэффициента шума, широкополосности, устойчивости усилителя обеспечиваются обычно несколькими каскадами усилителей.

2. Независимо от уровня сигнала на входе приемника необходимо поддерживать уровень сигнала на выходе предварительной аналоговой части выше заданного порогового уровня. То есть сигнал на входе фотонного АЦП должен поддерживаться вблизи верхней границы динамического диапазона. Для этого потребуется реализовать перестраиваемый коэффициент усиления.

Для решения данных требований возможно несколько решений. Одним из способов является использование автоматической регулировки усиления (АРУ), которая может обеспечить уровень сигнала на входе АЦП в рамках ограниченного динамического диапазона, максимальное значение отношения сигнал/шум (SNR). Однако в случае многодиапазонного приема в предварительной части сложно ориентироваться на уровни сигналов. Вполне возможны ситуации, когда одни полезные сигналы имеют высокий уровень на входе приемника, а другие – на грани его чувствительности. При настройке АРУ в предварительной части влияние мощных помех может привести к фактической потере слабых сигналов из-за их маскирования шумами АЦП [20]. Кроме того, три сиг-

нала – входной, выходной и управления – связаны функциональной нелинейной зависимостью, поэтому результат аналого-цифрового преобразования является нелинейным по отношению к входному сигналу, причем в условиях многодиапазонного приема в блоке цифровой обработки достаточно сложно определить параметры сигнала выбранного отдельного канала передачи информации.

Более перспективным вариантом является применение многоканальной структуры с переключением. Главной особенностью является использование нерегулируемых линейных каскадов усиления, причем все линейные каскады усиливают сигнал независимо от величины входного воздействия.

На рисунке 5 представлены варианты структурных решений.

Принцип работы представленных структурных схем заключается в том, что каждый канал с ФАЦП имеет различный коэффициент усиления. Сигнал с каждого канала одновременно подступает в блок цифровой обработки, в котором производится сравнение и переключение в зависимости от уровня сигнала. Важно, чтобы этот уровень находился в коридоре допустимых для применения ФАЦП значений и в рамках ограниченного динамического диапазона. Общая амплитудная характеристика в таком режиме определяется как результирующая характеристика всех каналов (рис. 6).

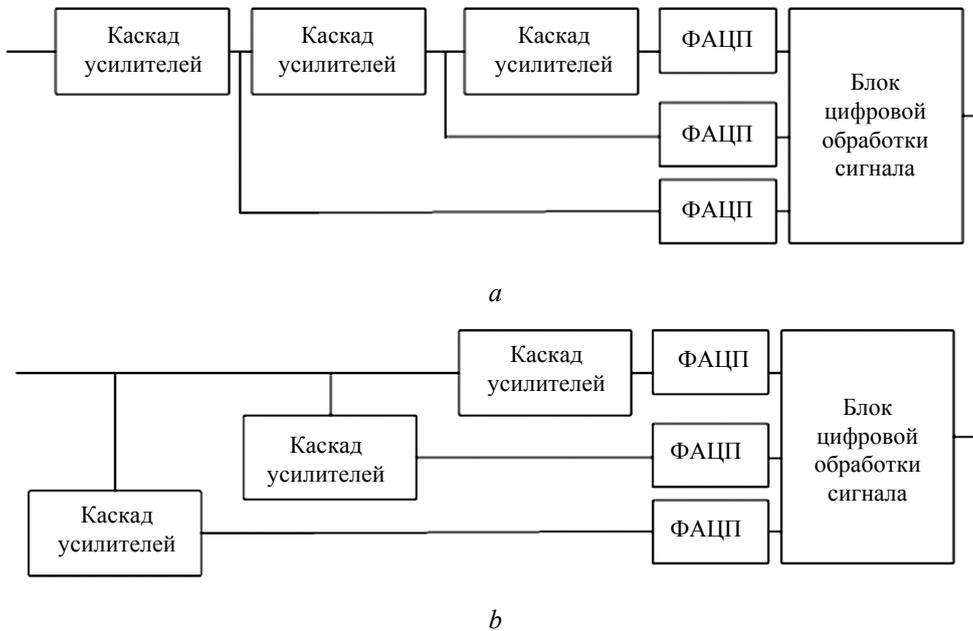


Рис. 5. Многоканальные структуры с переключением: *a* – с последовательным соединением усилительных каскадов; *b* – с параллельным соединением усилительных каскадов

Fig. 5. Multichannel structures with switching: *a* – with serial connection of amplifying cascades; *b* – with parallel connection of amplifying cascades

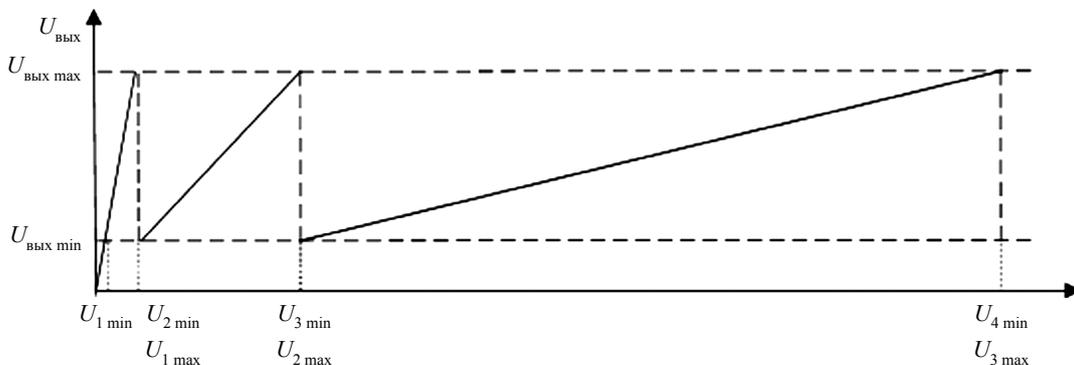


Рис. 6. Линейно-прерывистая амплитудная характеристика усилителя

Fig. 6. Linear-discontinuous amplitude characteristic of the amplifier

Важными отличиями структур (см. рис. 5) являются:

- в схеме (а) можно использовать меньшее количество усилителей, однако разное количество каскадов усилителей приводит к различию времени задержки в каждом канале. Возникает задача синхронизации сигналов по каналам;

- в параллельной схеме (b) потребуется большее количество усилителей для достижения необходимого коэффициента усиления на каждом канале, однако при параллельной схеме не возникает задача по синхронизации каналов, так как могут использоваться одинаковые линейные каскады усилителей, отличающиеся только коэффициентом усиления.

Отметим, что задача компенсации времени задержки сигналов по каналам может решаться программно в блоке цифровой обработки.

Представленные структурные решения позволяют реализовать радиоприемные устройства, способные принимать и обрабатывать сигнал СВЧ-диапазона без перестройки отдельных элементов аналоговой части, что свойственно, например, для программно определяемых радиосистем (software-defined radio, SDR). При этом за счет многоканальной структуры достигается требуемый уровень усиления сигнала, позволяющий добиться условий, при которых ФАЦП имеет наилучшие показатели, также это позволяет избежать ограничений динамического диапазона. Кроме того, появляется возможность переноса таких функций, как фильтрация, переключение и синхронизация каналов, в цифровую часть приемного устройства.

Заключение

В работе определены требования к структуре цифрового радиоприемного устройства с использованием фотонного АЦП.

Первым требованием является обеспечение аналоговой частью значительного усиления принятого радиосигнала для дальнейшего его использования радиопотонной элементной базой, а именно ФАЦП.

Второе требование заключается в реализации изменяемого коэффициента усиления для достижения наилучших показателей ФАЦП по CNR и ENOB, а также для увеличения динамического диапазона.

Представленное структурное решение в виде многоканальной схемы с переключением позволяет удовлетворить описанным требованиям и реализовать все преимущества использования фотонного АЦП. В структуре реализуется переключение линейных усилительных каскадов, что позволяет использовать в дальнейшей циф-

ровой обработке сигнал с наилучшими показателями. Наличие ФАЦП позволяет обрабатывать сигнал до 50 ГГц, исключить из структуры смеситель и антиалайзинговый фильтр благодаря высокой частоте дискретизации и повысить чувствительность за счет меньшего коэффициента шума.

Библиографические ссылки

1. *Wyglinski A.M.* (2018) Software-defined radio for engineers. Artech House, 2018, 375 p.
2. *Данилаев Д. П.* О выборе АЦП для цифрового приемника // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2019. Т. 10, № 3. С. 27–33.
3. *Lizon B.* (2020) Fundamentals of precision ADC noise analysis. Texas Instruments: Dallas, TX, USA, 2020, 65 p.
4. Применение радиопотоники в волоконно-оптических измерительных приборах / Е. В. Востриков, Е. В. Литвинов, С. А. Волковский, А. С. Алейник, Г. А. Польте // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1, № 1. С. 1–23. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23
5. *Якушенков П. О.* Фотонный АЦП // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174). С. 186.
6. *Стариков Р. С.* Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. Т. 1, № 3. С. 3–39.
7. *Чиров Д. С., Кочетков Ю. А.* Применение технологий радиопотоники в интересах формирования и обработки широкополосных радиолокационных сигналов // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2020. Т. 10, № 1. С. 15–24.
8. *Zhu X.* (2018) Photonic receiving and linearization of RF signals with improved spurious free dynamic range. Optics Communications, 2018, vol. 423, pp. 17-20.
9. *Liu Y.* (2021) An optical analog-to-digital converter with enhanced ENOB based on MMI-based phase-shift quantization. Photonics, MDPI, 2021, vol. 8, no. 2, pp. 52-65.
10. *Konishi T., Yamasaki Y.* (2018) Intensity jitter suppression and quantum fluctuation for resolution improvement in photonic analog-to-digital conversion: 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE, 2018, pp. 1-4.
11. *Yang J.* (2018) Broadband photonic ADC for microwave photonics-based radar receiver. Chinese Optics Letters, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 1-5.
12. *Serafino G.* (2019) Toward a new generation of radar systems based on microwave photonic technologies. Journal of Lightwave Technology, 2019, vol. 37, no. 2, pp. 643-650.
13. *Denisov A.E., Danilaev D.P.* (2023) Estimation of Parameters of Photonic Analog-to-Digital Converters. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-4. DOI: 10.1109/WECONF57201.2023.10147926
14. *Mohammadi M.* (2022) Recent advances on all-optical photonic crystal analog-to-digital converter

(ADC). *Optical and Quantum Electronics*, 2022, vol. 54, no. 3, pp. 192-214.

15. Малышев С. А., Чиж А. Л., Микитчук К. Б. Волоконно-оптические лазерные и фотодиодные модули СВЧ-диапазона и системы радиофоники на их основе // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2015. Т. 1. С. 10–18.

16. Воробьев О. В., Прасолов А. А. Сравнение методов повышения динамического диапазона АЦП цифровых радиоприемных устройств // *Труды учебных заведений связи*. 2018. Т. 4, № 2. С. 61–68.

17. Оценка коэффициента шума лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов / О. К. Барановский [и др.] // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2015. № 6 (92). С. 78–83.

18. Аронов Л. А., Доброленский Ю. С., Кулак Г. В. Статистическая модель гомодинного акустооптического спектроанализатора // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2020. Т. 23, № 1. С. 52–62.

19. Афанасьев В. М. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха – Цендера // *Прикладная фотоника*. 2016. Т. 3, № 4. С. 341–369.

20. Cruz P.M., Carvalho N.B. (2015) Improving Dynamic Range of Software Defined Radio Receivers for Multi Carrier Wireless Systems. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 16-23.

References

1. Wyglinski A.M. (2018) *Software-defined radio for engineers*. Artech House, 2018, 375 p.

2. Danilaev D.P. (2019) [About choosing an ADC for a digital receiver]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 27-33 (in Russ.).

3. Lizon B. (2020) *Fundamentals of precision ADC noise analysis*. Texas Instruments: Dallas, TX, USA, 2020, 65 p.

4. Vostrikov E.V., Litvinov E.V., Volkovskii S.A., Aleinik A.S., Pol'te G.A. (2020) [Application of radiophotonics in fiber-optic measuring devices]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2020, vol. 1, no. 1, pp. 1-23. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23 (in Russ.).

5. Yakushenkov P.O. (2021) [Photonic ADC]. *Foton-ekspress*, 2021, no. 6, p. 186 (in Russ.).

6. Starikov R.S. (2015) [Photonic ADCs]. *Uspekhii sovremennoi radioelektroniki*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 3-39 (in Russ.).

7. Chirov D.S., Kochetkov Yu.A. (2020) [Application of radiophotonics technologies for the formation and processing of broadband radar signals]. *DSPA: Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 15-24 (in Russ.).

8. Zhu X. (2018) Photonic receiving and linearization of RF signals with improved spurious free dynamic range. *Optics Communications*, 2018, vol. 423, pp. 17-20.

9. Liu Y. (2021) An optical analog-to-digital converter with enhanced ENOB based on MMI-based phase-shift quantization. *Photonics*, MDPI, 2021, vol. 8, no. 2, pp. 52-65.

10. Konishi T., Yamasaki Y. (2018) Intensity jitter suppression and quantum fluctuation for resolution improvement in photonic analog-to-digital conversion: 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). *IEEE*, 2018, pp. 1-4.

11. Yang J. (2018) Broadband photonic ADC for microwave photonics-based radar receiver. *Chinese Optics Letters*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 1-5.

12. Serafino G. (2019) Toward a new generation of radar systems based on microwave photonic technologies. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, vol. 37, no. 2, pp. 643-650.

13. Denisov A.E., Danilaev D.P. (2023) Estimation of Parameters of Photonic Analog-to-Digital Converters. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-4. DOI: 10.1109/WECONF57201.2023.10147926

14. Mohammadi M. (2022) Recent advances on all-optical photonic crystal analog-to-digital converter (ADC). *Optical and Quantum Electronics*, 2022, vol. 54, no. 3, pp. 192-214.

15. Malyshev S.A., Chizh A.L., Mikitchuk K.B. (2015) [Fiber-optic laser and photodiode modules of the microwave range and radiophotonics systems based on them]. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2015, vol. 1, pp. 10-18 (in Russ.).

16. Vorob'ev O.V., Prasolov A.A. (2018) [Comparison of methods for increasing the dynamic range of ADC digital radio receivers]. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 61-68 (in Russ.).

17. Baranovskii O.K. (2015) [Estimation of the noise coefficient of avalanche photodetectors in the photon counting mode]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, 2015, no. 6, pp. 78-83 (in Russ.).

18. Aronov L.A., Dobrolenskii Yu.S., Kulak G.V. (2020) [Statistical model of homodyne acousto-optic spectroanalyzer]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 52-62 (in Russ.).

19. Afanas'ev V.M. (2016) [Electro-optical modulator according to the Mach-Zehnder interferometer scheme]. *Prikladnaya fotonika*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 341-369 (in Russ.).

20. Cruz P.M., Carvalho N.B. (2015) Improving Dynamic Range of Software Defined Radio Receivers for Multi Carrier Wireless Systems. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, vol. 9, no. 1, pp. 16-23.

Dynamic Range of a Digital Radio Receiver with a Photonic Analog-to-Digital Converter

A.E. Denisov, Post-graduate, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia

D.P. Danilaev, DSc in Engineering, Associate Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia

The article is devoted to determining the requirements for the preliminary, analog part of the receiver and its structure when using a photonic ADC. The subject of research in this case is the issues of ensuring a large dynamic range of signals at the input of a receiver with a photonic ADC.

The parameters and properties of the PADC with optical quantization and discretization are investigated. The distinctive features of the PADC are a high sampling rate, about 100 GHz, the possibility of increasing the carrier-to-noise ratio (CNR) and the effective number of bits (ENOB) due to the amplification of the carrier or modulating signal, and a low noise factor of microwave photonic elements. The presented advantages make it possible to reduce the structure of the analog part of the receiver by eliminating the mixer and anti-aliasing filter, as well as to achieve better sensitivity due to a lower level of internal noise.

The study also revealed a limitation of the dynamic range imposed by the photonic element base. The reason for the limitation is the nonlinearity of the electro-optical modulators used and the limitation of the upper limit of the dynamic range to the photodetectors used. All this leads to requirements under which the analog part must provide significant amplification of the received radio signal, as well as the implementation of a variable gain.

As a result, structural solutions are presented in the form of multichannel switching circuits. The principle of operation lies in the fact that each channel, consisting of a cascade of linear amplifiers and a PADC, has a different gain, and in the digital processing unit, channels are compared and switched depending on the signal level. At the same time, the level should be in the "corridor" of acceptable values for the application of the PADC and within the dynamic range.

The presented structural solutions will make it possible to implement radio receivers capable of receiving and processing a microwave signal without transferring the signal to an intermediate frequency. At the same time, the required signal amplification level of $10^5 - 10^6$ can be achieved, which makes it possible to achieve a signal level of 2.5-9.5 V, at which the photonic analog-to-digital converter has the best CNR and ENOB indicators.

Keywords: photonic analog-to-digital converter, dynamic range, carrier-to-noise ratio, effective number of bits, multichannel structure.

Получено 14.09.2023

Образец цитирования

Денисов А. Е., Данилаев Д. П. Структура цифрового радиоприемного устройства с фотонным аналого-цифровым преобразователем // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 4. С. 77–85. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-77-85

For Citation

Denisov A.E., Danilaev D.P. (2023) [Dynamic Range of a Digital Radio Receiver with a Photonic Analog-to-Digital Converter]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 4, pp. 77-85 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-77-85