

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ С ЗАДАНЫМИ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

© 2016

А. Ю. Барабошин начальник научно-исследовательской лаборатории, Самарский филиал «Самарское отделение научно-исследовательского института радио», bay@soniir.ru

О. А. Минаева инженер, Самарский филиал «Самарское отделение научно-исследовательского института радио», minaeva.oa@soniir.ru

Определены основные причины возникновения нежелательных изменений в частотной характеристике сигналов на выходе современных генераторов. Рассмотрена функциональная схема построения генератора радиосигналов специальной формы с использованием отечественной элементной базы на примере упрощённой схемы бортового радиопередающего устройства для малого космического аппарата «АИСТ-2». Описана работа и взаимодействие блоков функциональной схемы, а также принцип формирования сигналов с различными типами модуляции. Проведён анализ разработанного устройства. Определены блоки, вносящие наиболее значительные нежелательные изменения в частотную характеристику выходного сигнала. Описан метод устранения неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧЧ). Приведены спектры выходного сигнала до и после частотной коррекции. Пояснён процесс возникновения паразитной амплитудной модуляции в цифровом вычислительном синтезаторе при формировании сигналов с частотами, близкими к частоте Найквиста. Описан метод борьбы с паразитной амплитудной модуляцией, возникающей вследствие применения цифрового аттенюатора в цифровом вычислительном синтезаторе. Приведены результаты практического применения метода. Показано, что применение предложенных методов позволяет разработать генератор сигналов специальной формы, обеспечивающий требуемые спектральные характеристики сигналов.

Спектральная характеристика; генератор радиосигналов специальной формы; рандомизация амплитуды; неравномерность АЧЧ; паразитная модуляция; цифровой вычислительный синтезатор.

Цитирование: Барабошин А.Ю., Минаева О.А. Формирование сигналов с заданными спектральными характеристиками // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 124-130. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-124-130

Современные радиоэлектронные устройства, предназначенные для формирования сигналов специальной формы, содержат цифровые и аналоговые части, каждая из которых вносит нежелательные изменения в спектральную характеристику выходного сигнала. В цифровых устройствах это, как правило, связано с недостаточной точностью квантования, а в аналоговых – со значительно большим количеством факторов, среди которых: зависимость от частоты сопротивлений реактивных элементов, параметров полупроводниковых приборов (транзисторов, диодов); тепловые шумы; дробовые шумы; мерцательные (избыточные) шумы [1].

Задача получения требуемой спектральной характеристики генератора радиосигналов специальной формы возникла в процессе разработки бортового радиопередающего устройства (БРПУ) для малого космического аппарата «АИСТ-2». Требования технического задания представлены в табл. 1.

БРПУ обеспечивает формирование следующих типов сигналов: последовательность монохроматических импульсов, последовательность импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), последовательность фазоманипулированных импульсов (BPSK), кодируемых M-последовательностью.

Его упрощённая функциональная схема представлена на рис. 1. БРПУ состоит из основного радиопередающего устройства (РПДУ) и резервного – его точной копии, находящейся в холодном резерве. Блоки, входящие в состав схемы синтезатора, выделены серым цветом.

Таблица 1. Требования технического задания к БРПУ

Техническая характеристика	Значение
Импульсная выходная мощность, не менее, Вт	200
Центральная частота сигнала, МГц	435
Максимальная ширина спектра рабочей полосы частот, МГц	30
Неравномерность АЧХ в рабочей полосе частот, не более, дБ	± 3
Уровень внеполосных излучений для режима ЛЧМ, дБн (при отстройке от центральной частоты, МГц)	-5 (± 15), -20 (± 19), -30 (± 22), -40 (± 25), -50 (± 29), -60 (± 33)
Уровень внеполосных излучений для режима фазовой манипуляции при модуляции М-последовательностью, дБн (при отстройке от центральной частоты, МГц)	-6 (± 15), -16 (± 48), -30 (± 107), -40 (± 189), -50 (± 336), -60 (± 599)
Уровни побочных излучений при отстройке от центральной частоты $\pm 43,5$ МГц, не более, дБн	-50

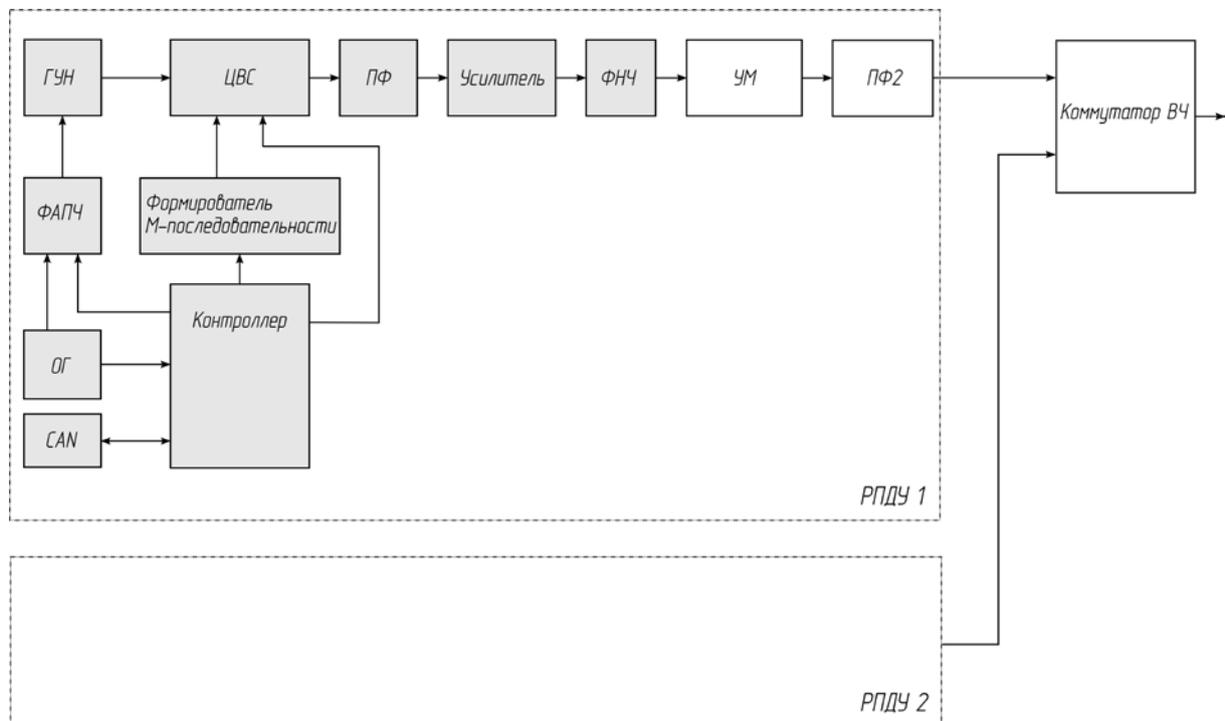


Рис. 1. Упрощённая функциональная схема БРПУ

Термостатированный опорный генератор (ОГ), система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и генератор, управляемый напряжением (ГУН), формируют сигнал тактовой частоты для цифрового синтезатора частоты. Контроллер на основании команды, полученной по шине CAN, конфигурирует значения регистров цифрового вычислительного синтезатора (ЦВС) для формирования сигналов с заданным типом излучения. Управляемый контроллером формирователь М-последовательности аппаратно переключает профили ЦВС, осуществляя фазовую манипуляцию. Полосовой фильтр (ПФ1) выделяет полосу полезного сигнала, усилитель компенсирует ослабление в пассивных цепях и формирует требуемый уровень выходного сигнала, а фильтр нижних частот (ФНЧ) минимизирует уровень гармоник на выходе синтезатора.

Транзисторный усилитель мощности (УМ) обеспечивает требуемую выходную мощность сигнала. Для выполнения требований к уровням внеполосных и побочных излучений применяется полосовой фильтр (ПФ2). Выходные сигналы основного и резервного РПДУ объединяются с помощью коммутатора высоких частот (коммутатор ВЧ).

Формирование BPSK-сигнала и монохроматических импульсов производится аппаратным переключением профилей ЦВС. В случае с BPSK поочередно переключаются профили, отличающиеся только значениями фазы. Для формирования монохроматических импульсов производится переключение двух профилей, сконфигурированных соответственно на наличие и отсутствие излучения. Формирование сигнала с ЛЧМ осуществляется с использованием аппаратных возможностей ЦВС, позволяющих сформировать сигнал с ЛЧМ, имеющий заданную девиацию частоты и длительность импульса.

В результате настройки РПДУ в сборе были выявлены блоки, вносящие значительную неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) радиопередающего устройства. К ним относятся усилитель мощности (УМ), имеющий неравномерную АЧХ, полосовой фильтр (ПФ2) и коммутатор ВЧ.

Результаты предварительного измерения неравномерности спектра выходного сигнала в рабочей полосе частот представлены на рис. 2.

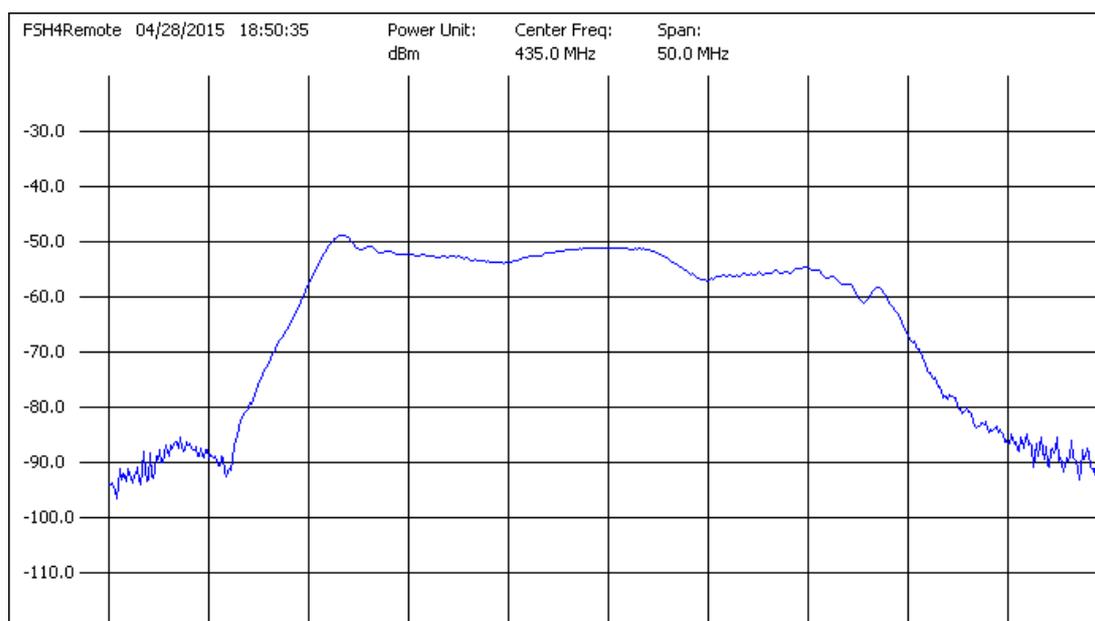


Рис. 2. Спектр выходного сигнала до коррекции

На рис. 2, 3, 4, 6 по оси абсцисс отложена частота в пределах от 410 до 460 МГц, по оси ординат – уровень сигнала в дБм.

Из рис. 2 видно, что на более высоких частотах уровень сигнала заметно снижен: минус 49 дБм – в начале рабочего участка и минус 61 дБм – в конце.

Таким образом, неравномерность спектра выходного сигнала в рабочей полосе частот достигает 12 дБ.

Для выполнения требований технического задания возникла потребность в корректировке спектра выходного сигнала. Ввиду того, что регулировка спектральных характеристик в аналоговых каскадах является сложной, многокритериальной задачей, решение которой чаще всего является компромиссным, было принято решение осуществлять частотную коррекцию цифровым способом, используя возможности ЦВС.

В разрабатываемом БРПУ в качестве ЦВС используется отечественная микросхема 1508ПЛ8Т производства ОАО НПЦ «ЭЛВИС». Данная микросхема имеет 10-разрядный ЦАП, работающий на частоте до 1 ГГц, обеспечивает формирование гармонических квадратурных колебаний и сигналов с ЛЧМ, амплитудно-фазовой (QAM), частотной и фазовой манипуляцией (ЧМ и ФМ). Кроме того, микросхема содержит генератор фазового и амплитудного шума и 64 профиля для хранения узловых значений параметров частотно-зависимой коррекции в режиме излучения ЛЧМ сигнала [2].

Частотная коррекция осуществлялась путём задания значений ослабления на узловых частотах. При этом значения ослаблений на промежуточных частотах вычисляются автоматически методом кусочно-линейной интерполяции.

В результате частотной коррекции неравномерность спектра в рабочей полосе частот уменьшилась с 12 до 5 дБ, что соответствует требуемым характеристикам (табл. 1).

Спектр выходного сигнала после частотно-зависимой коррекции представлен на рис. 3.

Существует ещё одна трудность в получении требуемых спектральных характеристик, вызванная возникновением паразитной амплитудной модуляции, отчётливо различимой на спектре выходного сигнала в сервисном режиме непрерывного излучения (рис. 4).

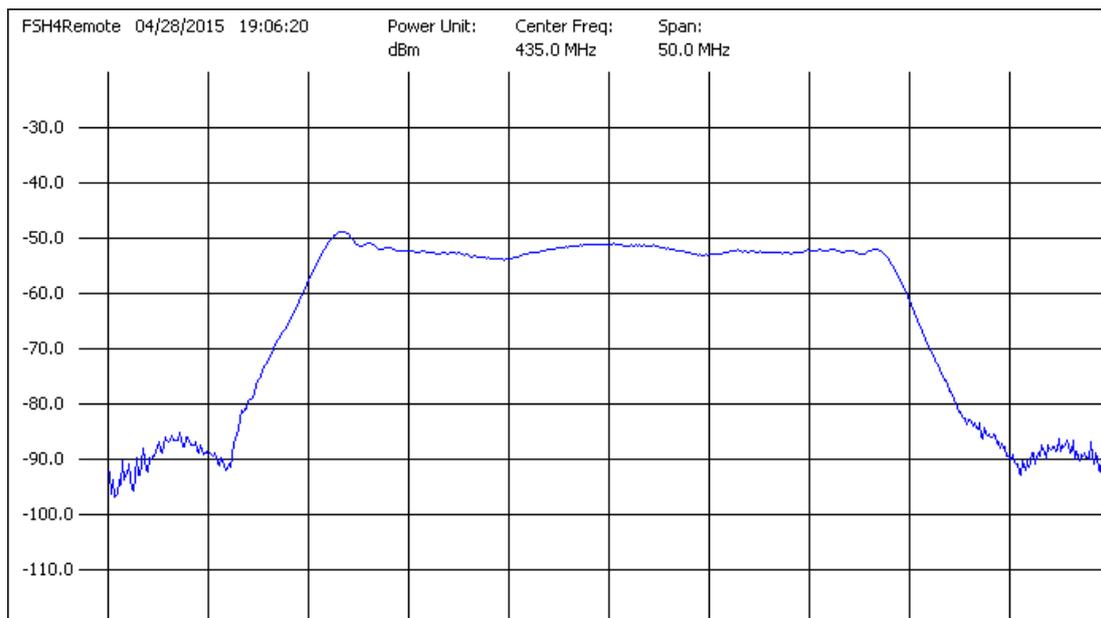


Рис. 3. Спектр выходного сигнала после коррекции

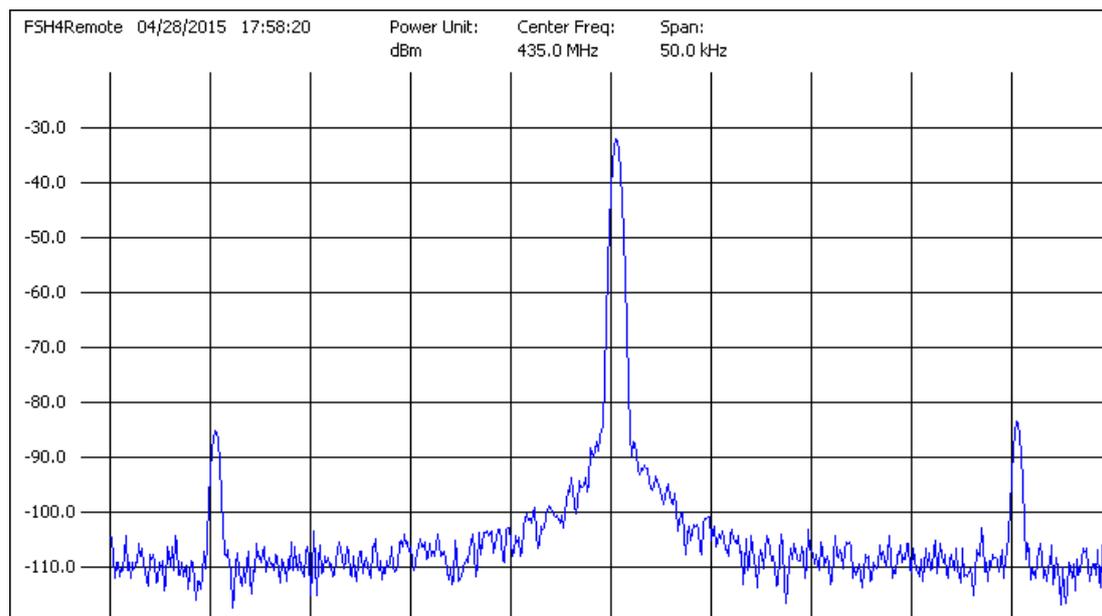


Рис. 4. Спектр выходного сигнала до коррекции

Максимальный уровень помех достигал минус 53 дБн.

Примечателен тот факт, что данное искажение спектра наблюдалось не только на выходе РПДУ, но и на выходе платы синтезатора, что исключает влияние блоков УМ, ПФ2 и коммутатора ВЧ.

Возникновение паразитной АМ непосредственно связано с принципом работы ЦВС и условиями его использования.

При формировании гармонического сигнала в ЦВС аккумулятор фазы увеличивает своё значение на величину, определяемую соотношением:

$$dPh = \frac{F_{out} \cdot 2^n}{F_{clk}}, \quad (1)$$

где F_{out} – синтезируемая частота; F_{clk} – тактовая частота; n – разрядность регистра приращения фазы.

Значение аккумулятора фаз подаётся на вход преобразователя фаза-амплитуда.

Задача получения сигнала заданной частоты усложняется тем фактом, что при тактовой частоте ЦВС, равной 1 ГГц, требуется обеспечить формирование сигнала с частотой до 450 МГц. Следовательно, теорема Котельникова – Найквиста – Шеннона выполняется при отношении частот, близких к крайнему допустимому значению (частоте Найквиста).

Рис. 5 иллюстрирует работу преобразователя фаза-амплитуда в данных условиях. По оси ординат отложена амплитуда сигнала (a_n – значение регистра амплитуд, $n = 0 \dots 2^m$, где m – разрядность регистра амплитуд), по оси абсцисс – время, по дополнительной оси абсцисс – фаза (φ_i – значение регистра амплитуд, при $i = 0 \dots 2^n$, где n – разрядность регистра приращения фазы).

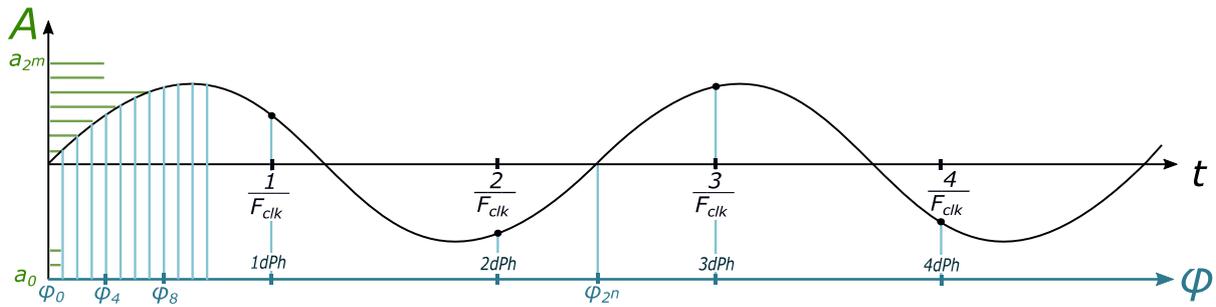


Рис. 5. Формирование сигнала в преобразователе фаза – амплитуда

Из рис. 5 видно, что при формировании сигнала с частотой, близкой к частоте Найквиста, на один период сигнала синтезируемой частоты приходится две выборки значений амплитуд, которые смещаются от периода к периоду, порождая паразитную амплитудную модуляцию.

Выходное значение преобразователя фаза-амплитуда перемножается со значением ослабления регистра цифрового аттенюатора в составе ЦВС. Использование при регулировке уровня выходного сигнала РПДУ цифрового аттенюатора уменьшает количество уровней квантования и амплитуда модулированной помехи возрастает.

Для устранения нежелательных дискретных составляющих в спектре выходного сигнала используется аппаратная рандомизация амплитуды, выполняемая в ЦВС. Рандомизация амплитуды устраняет периодичность в процессе формирования модулированной помехи. В результате уровень помех, вызванных паразитной амплитудной модуляцией, уменьшился на 13 дБ и составил минус 66 дБн (рис. 6).

Представленные методы коррекции спектральной характеристики выходного сигнала генератора позволили выполнить требования технического задания к БРПУ для малого космического аппарата «АИСТ-2». В результате применения частотно-зависимой коррекции неравномерность спектра в рабочей полосе частот уменьшилась на 7 дБ. Применение аппаратной рандомизации амплитуды позволило уменьшить уровень помех, вызванных паразитной амплитудной модуляцией, на 13 дБ.

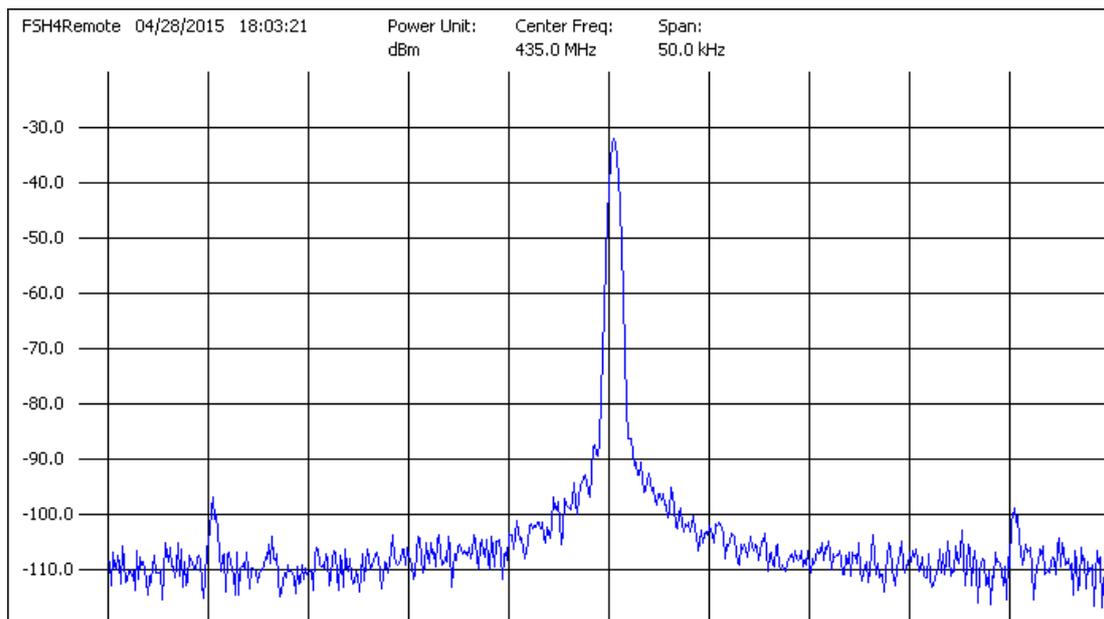


Рис. 6. Спектр выходного сигнала после коррекции

Библиографический список

1. Савицкая М.П., Ботнар Л.Б. Аналоговые электронные устройства. Модуль 1: уч. пособие. Одесса: Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, 2008. 108 с.
2. Микросхема интегральная 1508ПЛ8Т. Техническое описание. М.: ОАО НПЦ «ЭЛВИС», 2012. 31 с.

GENERATION OF SIGNALS WITH PRESCRIBED SPECTRAL CHARACTERISTICS

© 2016

- A. Yu. Baraboshin** Head of Research Laboratory, Federal State Unitary Enterprise Radio Research and Development Institute, Samara Branch, Russian Federation, bay@soniir.ru
- O. A. Minaeva** engineer, Federal State Unitary Enterprise Radio Research and Development Institute, Samara Branch, Russian Federation, minaeva.oa@soniir.ru

The main causes of undesirable changes in signal frequency-amplitude characteristics at the output of modern generators are stated in the paper. A functional scheme of the waveform generator is presented. The generator is constructed with the use of home-produced hardware components. A simplified scheme of the on-board transmitting device for the small spacecraft «Aist-2» is taken as an example. The operation and interaction of units of the scheme, as well as the principle of generation of signals with various types of modulation are described. The device developed is analyzed. The units that make the most undesirable changes in the frequency-amplitude characteristic of the output signal are identified. A method of combatting bandpass flatness of frequency-amplitude characteristics is described. The spectra of the output signal prior to and after frequency correction are presented. The process of origination of parasitic amplitude modulation in a digital computation synthesizer in the case of generating signals with frequencies close to the Nyquist rate is explained. A method of combatting parasitic amplitude modulation caused by the use of a digital attenuator in the digital computation synthesizer is also discussed. It is shown that the application of the methods proposed makes it possible to develop a special waveform generator that can ensure the required spectral characteristics of the signals.

Spectral characteristic; waveform generator; amplitude randomization; bandpass flatness; parasitic modulation; digital synthesizer.

Citation: Baraboshin A.Yu., Minaeva O.A. Generation of signals with prescribed spectral characteristics. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 124-130. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-124-130

References

1. Savitskaya M.P., Botnar L.B. *Analogovye elektronnyye ustroystva. Module 1:* [Analog electronic devices Module 1: Textbook]. Odessa: Odessa National O.S. Popov Academy of Telecommunications Publ., 2008. 108 p.
2. *Mikroskhema integral'naya 1508PL8T. Tekhnicheskoe opisanie* [Integrated circuit 1508PL8T. Datasheet]. Moscow: Open Joint-Stock Company Research and Development Center «ELVEES» Publ., 2012. 31 p.