

УДК 62-791.2

Радиопередающее устройство с частотной модуляцией и временным разделением каналов для высокоинформативных телеметрических систем

Н. В. Грибков, А. В. Бобылев, Ю. А. Юрков, С. Ю. Жуковский, В. Н. Грибков¹

¹к. т. н.

АО «НПО ИТ», Россия

e-mail: Gribkov_n@npoit.ru

Аннотация. Рассматриваемое устройство относится к технике связи для применения в радиотелеметрических системах передачи информации с частотной модуляцией и временным разделением каналов. В статье рассматривается метод формирования информационных потоков с удвоенной информативностью — 2×640 кГц в структуре телеметрической системы типа «СКУТ-40». Используемые схемотехнические решения позволяют уменьшить влияние переходных помех на границах формирования измерительных и служебных сигналов на номинальное значение опорной несущей частоты. Сформированные телеметрические потоки переданы по радиоканалу с помощью доработанного штатного радиопередающего устройства типа УПМ и приняты приемно-регистрирующей аппаратурой типа ПРА «Вектор» на двух несущих частотах. Результатом предлагаемых технических решений является существенное увеличение (в 2 раза) информативности радиоканала типа «СКУТ-40», что делает весьма перспективным практическое внедрение достигнутого технического задела в существующие комплексы телеметрических измерений.

Ключевые слова: информативность радиоканала, переходной процесс, несущая частота, бортовая радиотелеметрическая система

Radio Transmitter with Frequency Modulation and Time Division of Channels for High-Information Telemetry Systems

N. V. Gribkov, A. V. Bobylev, Yu. A. Yurkov, S. Yu. Zhukovskiy, V. N. Gribkov¹

¹candidate of engineering science

Stock company "Scientific-production Association measuring equipment", Russia

e-mail: Gribkov_n@npoit.ru

Abstract. The paper studies a communication device that is applied in radio telemetry systems for information transfer with frequency modulation and time division of channels. The method for forming a data flow with the doubled informational content (2×640 kHz) in the telemetry system structure of the "SKUT-40" type is considered in the article. The employed circuit engineering solutions make it possible to reduce the effect of crosstalks at the borders of forming measured and service signals upon the nominal value of the reference frequency. The created data flows are transmitted over a radio channel through the modified standard radio transmitter of the UPM type and received by receiving and recording equipment like "Vector" at two carrier frequencies. The result of the proposed technical solutions is the essential increase (by 2 times) of information content of the radio channel of the "SKUT-40" type that is a contributing factor for rather promising practical implementation of the reached technical base into the existing complexes of telemetry measurements.

Keywords: radio channel information content, transient process, carrier frequency, onboard radio telemetry system

В настоящее время в рамках ОКР «Надежность РН» проводились и проводятся работы по повышению информативности телеметрического радиоканала типа «СКУТ-40» [1]. Актуальность данного вопроса особенно возросла в связи с задачей совместной передачи телеметрической информации и видеоинформации. Известно, что для передачи последовательности кадров видеоизображения, содержащих информацию о динамике происходящих на борту процессов, требуется достаточно высокая пропускная способность канала связи, реально оцениваемая величинами порядка 1–10 Мбит/с в зависимости от задаваемых временного и пространственного разрешений. Так, информативность каждого из двух передающих устройств бортовой видеосистемы ОСАМ-2 немецкой фирмы Kauser-Threde составляет около 5 Мбит/с [2].

Повышение информативности также весьма актуально для телеметрирования значительного количества широкополосных быстроменяющихся параметров (БМП), объем измерений которых иногда составляет до 80% от суммарного значения.

С другой стороны, наращивание информативности для бортовых средств наталкивается на ряд серьезных трудностей, главными из которых являются:

1. Дефицит частотного ресурса, особенно метрового диапазона.
2. Высокие требования к надежности и качеству приема данных, включая нештатные ситуации.
3. Высокая стоимость разработки и внедрения новых радиопередающих и приемных средств.

Проводимые исследования и проработка показывают, что значительные возможности увеличения информативности тем не менее имеются, даже в отношении давно используемого радиоканала типа «СКУТ-40». Данный радиоканал обеспечивает информативность 2×320 тыс. изм./с, высокую надежность в сложных условиях эксплуатации, а бортовая радиотелеметрическая система «СКУТ-40» зарекомендовала себя самым лучшим образом для испытаний высокودинамичных изделий, особенно для измерения БМП. Имеется широкий ряд бортовых радиопередающих устройств метрового и дециметрового диапазонов, которые

серийно изготавливаются и применяются в телеметрических системах данного типа. В частности, в АО «НПО ИТ» серийно выпускается для системы «СКУТ-40» передающее устройство (ПУ) типа УПМ БЫ2.000.028.

Тема данной работы — рассмотрение наиболее принципиальных решений и результатов комплекса проведенных схемотехнических, конструкторско-технологических и экспериментальных работ отдельных узлов ПУ типа УПМ, а также лабораторных испытаний радиоканала в целом с информативностью, в два раза превосходящей штатный канал системы «СКУТ-40».

Передающая часть рассматриваемого радиоканала построена на базе ПУ типа УПМ, доработанного под информативность 2×640 тыс. изм./с конструктивное исполнение которого представлено на рис. 1.

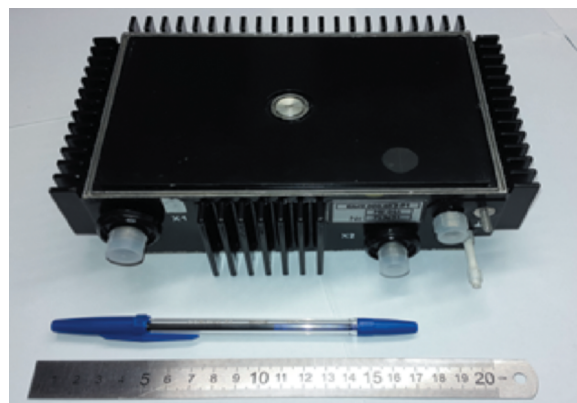


Рис. 1. Передающее устройство типа УПМ БЫ2.000.028

Прием данных осуществлялся прямо-регистрающей аппаратурой ПРА «Вектор» (рис. 2), разработанной в АО «НПО ИТ», с соответствующими прошивками электронной части приемника.



Рис. 2. ПРА «Вектор» БЫ1.400.051

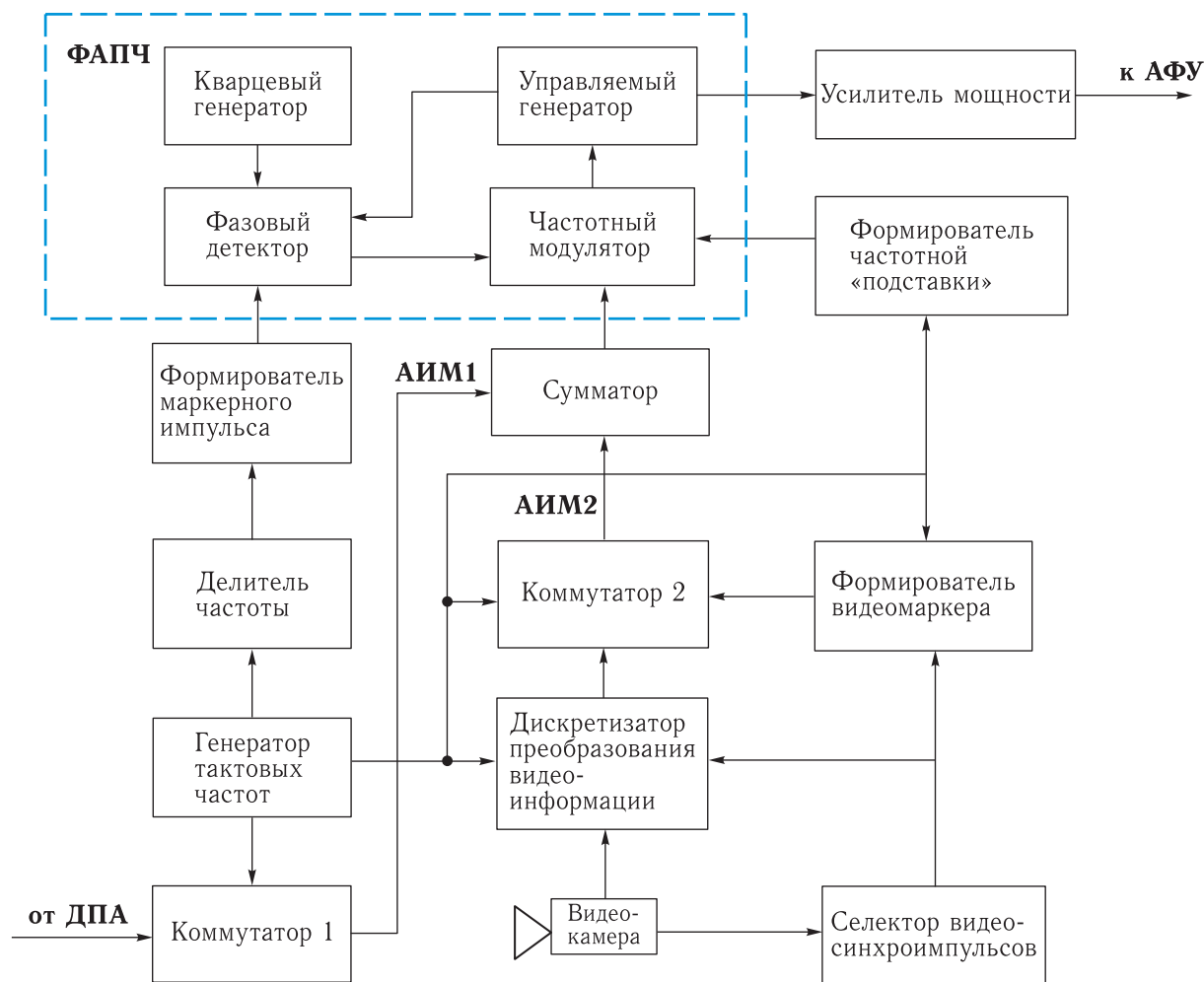


Рис. 3. Структурная схема ПУ

Структурная схема рассматриваемого ПУ, предназначенного для совмещенной передачи телеметрической и видеоинформации (как варианта), представлена на рис. 3.

Данное устройство включает следующие основные элементы: блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), генератор тактовых частот, формирователи маркерного импульса и частотной «подставки», первый и второй коммутаторы, усилитель мощности для согласования с антенно-фидерным устройством (АФУ) и ряд других элементов.

Устройство работает следующим образом: коммутатор 1 осуществляет сбор измерительной информации по первому потоку от датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) с формированием амплитудно-импульсно-модулированных сигналов АИМ1. Коммутатор 2 осуществляет форми-

рование сигналов АИМ2 второго потока, в качестве которого могут быть использованы сигналы видеоинформации, например, от бортовых видеокамер (ВК) так, как это показано на рис. 4, а. Уровни измерительных сигналов АИМ1, АИМ2 представлены в телеметрической шкале 6,2 В. По времени каждый поток сдвинут относительно друг друга на четверть периода или половину такта τ , т. е. $\frac{\tau}{2}$ или 0,75 мкс. Данный сдвиг позволяет сформировать выходной высокочастотный импульсный сигнал для передачи по радиоканалу (рис. 4, б). При этом осуществляется временное стробирование АИМ-сигналов последовательностью вырезающих импульсов $f_{ВИ}$ частотой 640 кГц.

Коммутаторы 1, 2 синхронизируются от генератора тактовых частот, работающего на частоте 640 кГц. Широкополосные сигналы поступают

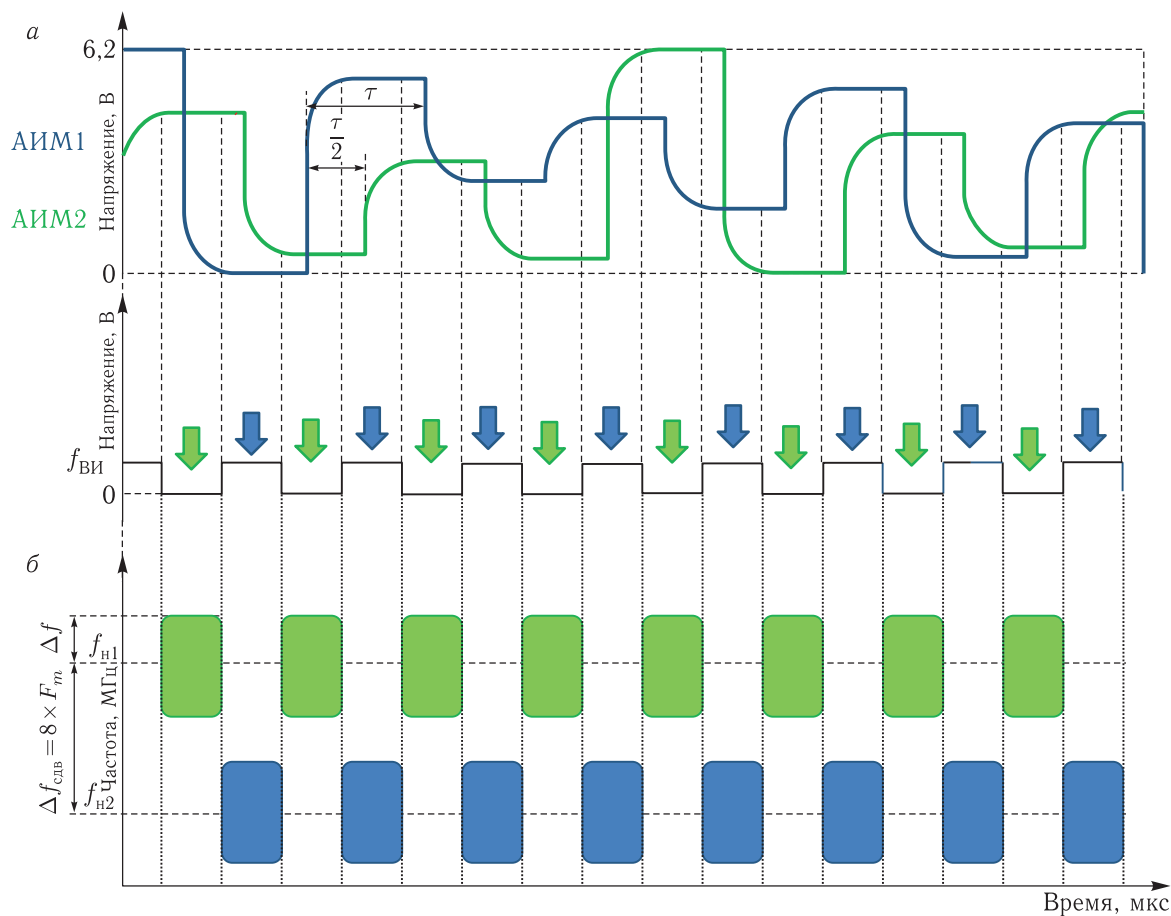


Рис. 4. а) Структура сигналов АИМ1, АИМ2; б) последовательность перестройки частоты АИМ1 и АИМ2

на дискретизатор видеoinформации и на селектор видеосинхроимпульсов, в котором выделяют-ся строчные и кадровые синхроимпульсы. Видео-информация при помощи частоты генератора и син-хронизирующих импульсов оптимизируется под до-пустимую информативность (J) радиоканала со-гласно соотношению

$$J = P \times H \times G \times K,$$

где P — количество пикселей в строке, H — коли-чество строк в видеокадре, G — частота следования, K — число информационных каналов в потоке.

Формирователь видеомаркера формирует ви-деомаркерный сигнал для привязки видеoinформации к началу телеметрического кадра. Далее ин-формация через сумматор подается на вход частот-ного модулятора. На другой вход частотного мо-дулятора с выхода формирователя частотной «под-ставки» поступает управляющее двухуровневое

напряжение, которое обеспечивает скачкообразные изменения частоты частотного модулятора и сдвиг несущей частоты. С целью исключения взаимовли-яния частотно-модулированных потоков с несущи-ми частотами $f_{н1}$, $f_{н2}$, которые разнесены на ве-личину частотного сдвига $\Delta f_{сдв}$ рис. 4, б, равную восьми значениям тактовой частоты F_m , т. е.

$$\Delta f_{сдв} = 8 \times F_m,$$

где $F_m = 640$ кГц, что составляет $\Delta f_{сдв} = 5120$ кГц. Величина частотного сдвига опреде-ляется избирательностью наземных радиоприемных средств. На рис. 4, б условно показана девиация частоты Δf , равная 600 кГц, где первая несущая частота $f_{н1}$ модулируется первым информационным потоком АИМ1, а вторая несущая $f_{н2}$ модулирует-ся вторым информационным потоком АИМ2. Пере-ключение излучаемых несущих частот происходит без разрыва фазы, т. е. формированием частотно-

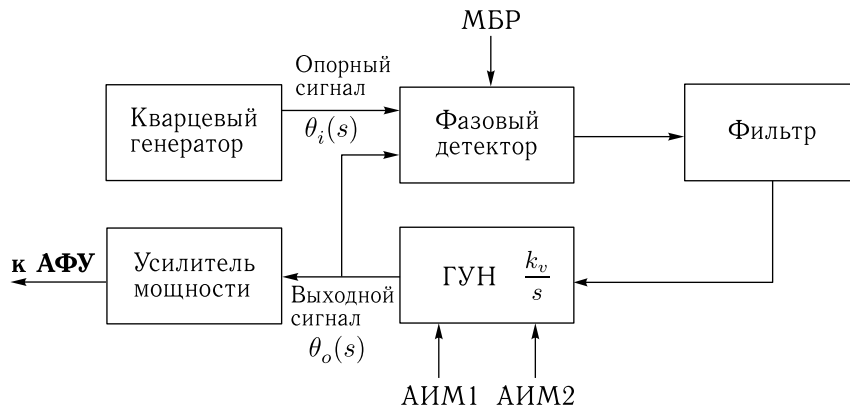


Рис. 5. Структурная схема узла коррекции

модулированного радиосигнала с непрерывной фазой (ЧМНФ), что позволяет существенно уменьшить ширину излучаемого спектра.

ФАПЧ обеспечивает стабилизацию несущих частот 1 и 2 потоков во время маркерного импульса 4τ , амплитуда которого соответствует середине измерительной шкалы потока и номинальному значению несущей частоты излучаемого сигнала.

Остановимся на особенностях частотозадающей части ПУ. Для этого на рис. 5 представлена структурная схема узла коррекции несущей частоты модулирующей части ПУ, выделенная на структурной схеме передающего устройства как блок ФАПЧ.

Работа узла поясняется эпюрами, представленными на рис. 6.

Передаваемая телеметрическая информация поступает на вход управляемого генератора в виде двух 40-канальных потоков сигналов АИМ1 и АИМ2 в течение времени 40τ . Фазовый детектор обеспечивает сравнение фаз сигналов кварцевого генератора и генератора, управляемого напряжением (ГУН), в течение времени воздействия маркера быстрого кадра (МБР) с частотой повторения 16 кГц (в 2 раза превышающий штатную частоту 8 кГц) на маркерном интервале $\tau_{\text{МБР}}$. При этом формирование среднего уровня шкалы и соответственно несущих частот производится в течение времени 4τ . Фазовый детектор формирует сигнал управления для компенсации ухода частоты управляемого генератора в результате воздействия на бортовую аппаратуру дестабилизирующих факторов (температуры, вибрации, механических

воздействий, старения элементов). Сигнал управления поддерживает несущие частоты в течение всего основного кадра до следующего импульса МБР.

Данная ФАПЧ, как и любая другая система автоматического регулирования, обладает инерционностью и требует определенного времени на процесс сравнения частот ГУН и кварцевого генераторов, формирования управляющего напряжения и подстройки несущей частоты. Переходные процессы могут иметь разнообразные формы, отличающиеся амплитудой, частотой и временем затухания. Эпюра одной из возможных реализаций $x(t)$ переходных процессов установления несущей частоты представлена на рис. 6. Для надежной передачи радиосигналов с заданной достоверностью необходимо исключить влияние переходных процессов на несущую частоту во время передачи информации.

Для решения задачи по исключению влияния переходных процессов проведена оценка их временных параметров. В работе [4] показано, что наблюдаемый отклик $x(t)$ радиочастотной системы ФАПЧ на входе ГУН в режиме переключения частоты в общем виде может быть представлен через обратное преобразование Лапласа:

$$x(t) = L^{-1} \left\{ \frac{\Theta_o(s)}{\Theta_i(s)} \left(\frac{\Delta\omega}{s^2} + \frac{\Delta\varphi}{s} \right) \left(\frac{k_v}{s} \right)^{-1} \right\},$$

где $\Theta_o(s)$ — фаза сигнала отклика (фаза выходного сигнала), $\Theta_i(s)$ — фаза сигнала воздействия (фаза опорного сигнала), $\frac{k_v}{s}$ — передаточная функция ГУН, $\Delta\omega$ — шаг переключаемой частоты,

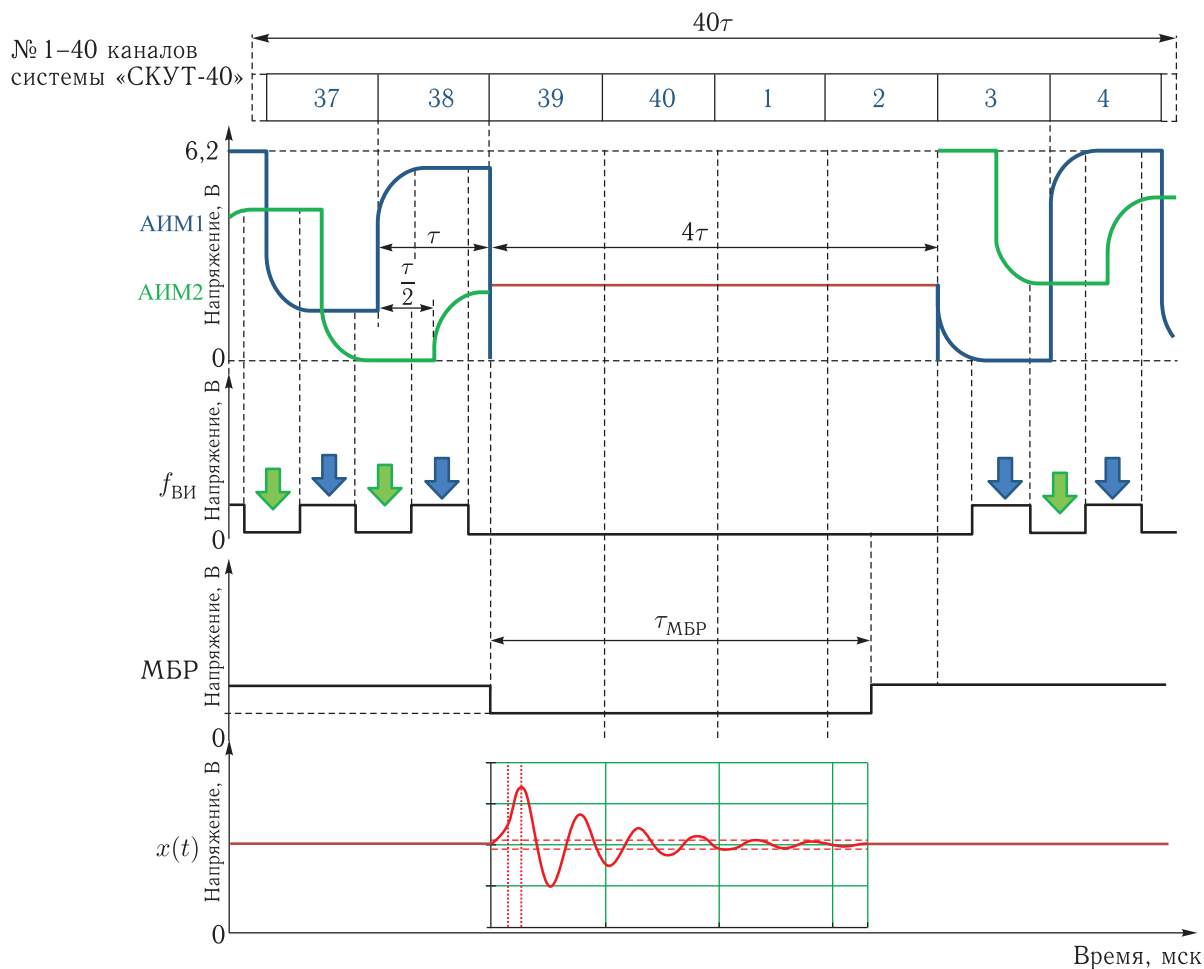


Рис. 6. Эпюры входных информационных сигналов ПУ

$\Delta\varphi$ — фазовый сдвиг переключаемой частоты, s — оператор передаточной функции.

Однако в связи с тем, что модуляция несущей частоты в рассматриваемом ПУ осуществляется с помощью целого ряда аналоговых преобразований, основанных на введении модулирующего сигнала в управляющую цепь варикапа, включенного в колебательный контур автогенератора, использование данного выражения для оценки длительности переходного процесса затруднительно, так как нелинейность и температурная зависимость характеристики управления ГУН вызывают неопределенность значения частоты. Экспериментально установлено, что время затухания сигнала $x(t)$ с погрешностью $\pm 0,5\%$ с некоторым запасом равно длительности четырех канальных времен в режиме 2×640 тыс. изм./с. В связи с этим информация по 1 и 2 каналам из-за сильных искажений пере-

дана быть не может. Другими словами, при уменьшении канального времени в 2 раза в режиме 2×640 тыс. изм./с. и сохранении структуры кадра необходимое время перестройки ФАПЧ на номинальное значение несущей частоты превышает суммарную длительность 39 и 40 каналов в 2 раза.

В связи с этим передача информации по первым двум каналам кадра основного коммутатора в рассматриваемом устройстве не производится. Временной интервал с 39 по 2 каналы предоставляется для автоподстройки номинального значения несущей частоты, что обеспечивает возможность приема телеметрического сигнала приемной станцией и последующей раскоммутации каналов.

На основе модели, полученной в работе [5], были проведены моделирование и расчет радиочастотного спектра выходного радиосигнала в структуре 2×640 тыс. изм./с с частотным и временным

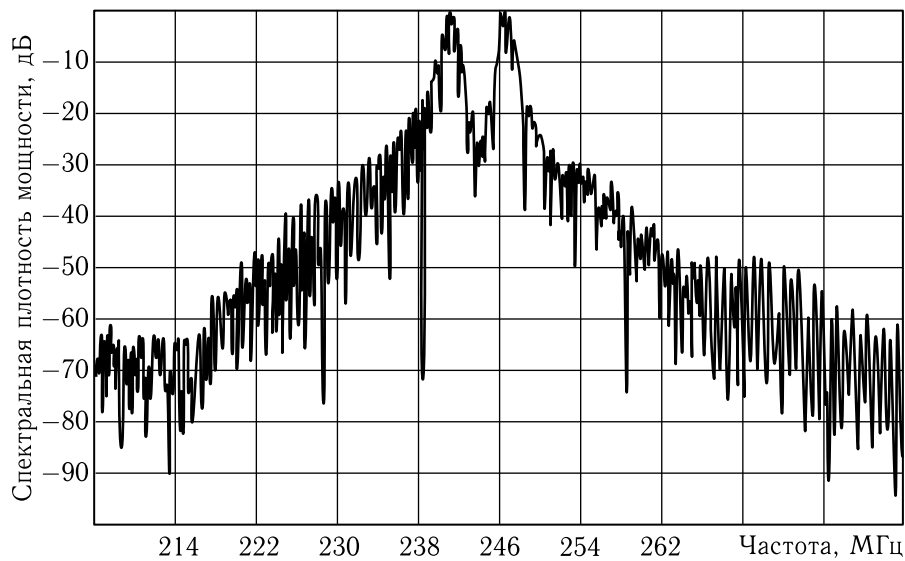


Рис. 7. Частотный спектр радиосигнала ЧМНФ в режиме 2×640 кГц

разделениями потоков. Результаты моделирования, подтвержденные экспериментальными измерениями с помощью спектрального анализатора типа Keysight N9000A, представлены на рис. 7. На рисунке изображен спектр радиосигнала ЧМНФ в режиме 2×640 кГц. При этом отчетливо просматривается «двугорбая» огибающая, представляющая собой суперпозицию спектров двух информационных потоков, разнесенных на 5120 кГц. Каждая из этих составляющих принимается отдельным приемным устройством. Ширина спектра радиосигнала каждого из потоков по уровню -30 дБ составляет около 5,5 МГц.

Выводы

1. Штатное радиопередающее устройство УПМ БЫ2.000.028 после доработки отдельных функциональных узлов обеспечивает передачу по радиоканалу информационных потоков с удвоенной информативностью 2×640 тыс. изм./с. в структуре системы типа «СКУТ-40». Благодаря сохранению общей структуры передаваемых сигналов возможны прием и обработка информации аппаратурой типа ПРА «Вектор».

2. Погрешность измерений переданных измерительных сигналов и вероятность выпадений в целом соответствуют параметрам при передаче данных в штатном режиме 2×320 тыс. изм./с.

3. Впервые в отечественной практике экспериментально была подтверждена возможность увеличения в 2 раза информативности системы «СКУТ-40» при сохранении структуры кадра.

4. Полученные результаты позволяют существенно расширить область применения радиоканала типа «СКУТ-40», что делает весьма целесообразным и перспективным практическое внедрение достигнутого технического задела в существующие комплексы телеметрических измерений.

Список литературы

1. Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. и др. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб.: Наука и Техника, 2007.
2. Kayser-Threde GmbH. Система оперативного видеонаблюдения OCAM-2 Interface meeting. ESA Paris. May 7, 2009.
3. Бобылев А.В., Грибков В.Н., Грибков Н.В., Жуковский С.Ю. и др. Устройство передачи сигналов с частотной модуляцией и временным разделением каналов. Патент РФ № 2556370 от 30.04.2014 г.
4. Алексеев Е.А. Синтезаторы прямого цифрового синтеза частоты: возможности и ограничения для микроволновой спектроскопии // Радиофизика и радиоастрономия. 2011. Т. 16, № 2. С. 209–219.
5. Анненков А.М. Модель радиоканала с частотной модуляцией и непрерывной фазой // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 7.