

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ БОРТОВОГО РЕТРАНСЛЯЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА

А. В. Шагов, В. В. Сухотин✉, Т. А. Зубов

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы, связанные с разработкой компьютерной модели бортового ретрансляционного комплекса с линейной ретрансляцией сигнала для анализа его фазовых искажений. Очень важным является знание фазовых искажений (набега) при определении координат источника радиоизлучения фазовым методом с использованием виртуальной антенной решётки в системах спутниковой связи. Обзор литературы, приведенный в статье, показал отсутствие возможности провести указанные исследования на существующих компьютерных моделях. На основе классического варианта структурной схемы бортового ретрансляционного комплекса была разработана компьютерная модель в среде MATLAB R 2016b (Simulink). В состав модели вошли приёмное устройство, входной и выходной мультиплексоры и усилители мощности. В качестве нелинейных усилителей были взяты математические модели Салеха и Горбани усилителей, реализованных на лампах бегущей волны, и твердотельных усилителей соответственно. Мультиплексоры реализованы в виде полосовых фильтров, подключенных параллельно. Гибридный делитель и ферритовые циркуляторы не вошли в модель. В модели есть возможность исследовать зависимость фазовых искажений сигнала от характеристик структурных блоков бортового ретрансляционного комплекса. Также в компьютерной модели предусмотрена возможность исследования влияния шума на фазовые искажения.

Ключевые слова: геостационарная орбита, фазовые искажения, шумы, модель, транспондер.

Введение

Бортовой ретранслятор, полезная нагрузка на космическом аппарате (КА), представляет собой комплекс, состоящий из: приёмного и передающего антенно-фидерного устройства (АФУ), приёмного устройства, усилителей мощности (УМ), входной и выходной матриц резервирования, входного (ИМУХ) и выходного (ОМУХ) мультиплексора. Классический вариант структурной схемы бортового ретрансляционного комплекса (БРК) [1] представлен на рис. 1.

Как видно из рисунка, происходит линейная ретрансляция сигнала, что дает возможность решить задачу определения координат источника радиоизлучения (ИРИ) с применением спутниковых систем связи фазовым методом [2] с использованием виртуальной антенной решётки [3], однако важно знать и учитывать набег фазы в БРК. Например, при решении навигационной задачи на основе фазовых измерений, учитывая фазовые искажения,

погрешности определения относительных координат могут быть достигнуты порядка нескольких миллиметров [4].

Целью работы стала разработка виртуальной модели БРК космического аппарата с линейной ретрансляцией на геостационарной орбите для анализа фазовых искажений ретранслируемого сигнала.

Задачами явились обзор существующих аналогов и разработка компьютерной модели БРК без учета влияния ферритовых циркуляторов и гибридных делителей на искажение фазы.

1. Обзор существующих компьютерных моделей

БРК со сквозной ретрансляцией выполняет функцию приема сигналов от наземных земных станций, усиления этих сигналов и передачи их на другие земные станции.

Первые поколения советских и российских БРК были построены на основе СВЧ-приёмопередатчика по супергетеродинному принципу [5]. УМ уже тогда строились на ЛБВ. Но такой подход имел ряд недостатков, среди которых большая масса и габариты.

✉ vsuhotin@sfu-kras.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2023

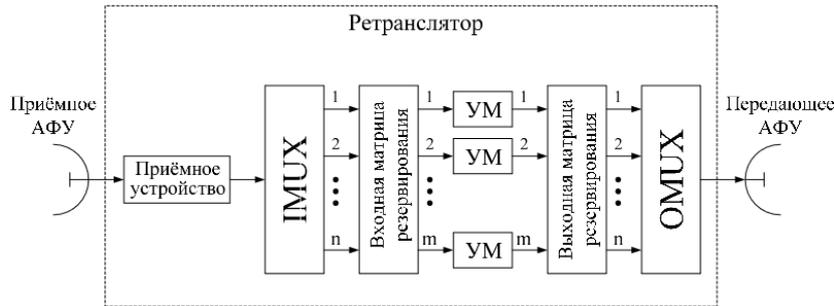


Рис. 1. Структурная схема бортового ретрансляционного комплекса с n-стволами

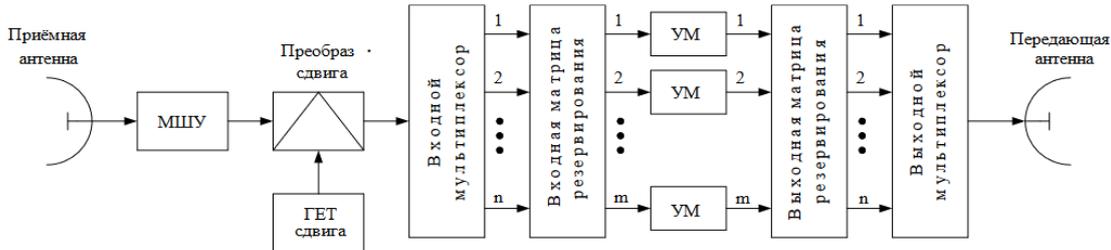


Рис. 2. Блок-схема БРК «Ямал-100»

На рис. 2 представлена принципиально новая схема построения БРК [1, 5], которая была использована при создании БРК «Ямал-100».

В [5] рассматривается история создания БРК «Ямал» и обращается внимание на то, что он получил принципиально новую схему построения, что является прорывным этапом в построении отечественных КА. Представленная структурная схема соответствует исследуемой и будет использована при моделировании, но с учётом некоторых правок. Впоследствии в качестве УМ стали использовать УЛБВ и твердотельный предусилитель, который также необходимо учитывать при исследовании фазовых искажений.

Усилители на ЛБВ БРК КА «Ямал-200» были существенно доработаны: КПД увеличен до 50 %, ресурс составляет 10–15 лет, на входе УЛБВ внедрены твердотельные усилители, что позволило получить усиление до 70–80 дБ, и другие изменения.

Данная модель является аналогичной исследуемой, но в этой работе рассматриваются принципы построения БРК и не затрагиваются темы амплитудных/частотных искажений при прохождении сигнала через ретранслятор.

Аналогом можно считать моделирование передачи диагностирующих сигналов через загруженный ретранслятор с нелинейной передаточной характеристикой [6]. Целью данной работы было моделирование диагностических сигналов для определения необходимых характеристик БРК и мониторинг состояния его загрузки.

На рис. 3 представлена структура системы для моделирования передачи диагностирующих сигналов.

Данная модель направлена на решение задач диагностики БРК и не рассматривает его структурную схему и влияние отдельных блоков на изменения фазы сигнала, вносимые ретранслятором. Также не раскрывается подробная схема ретран-

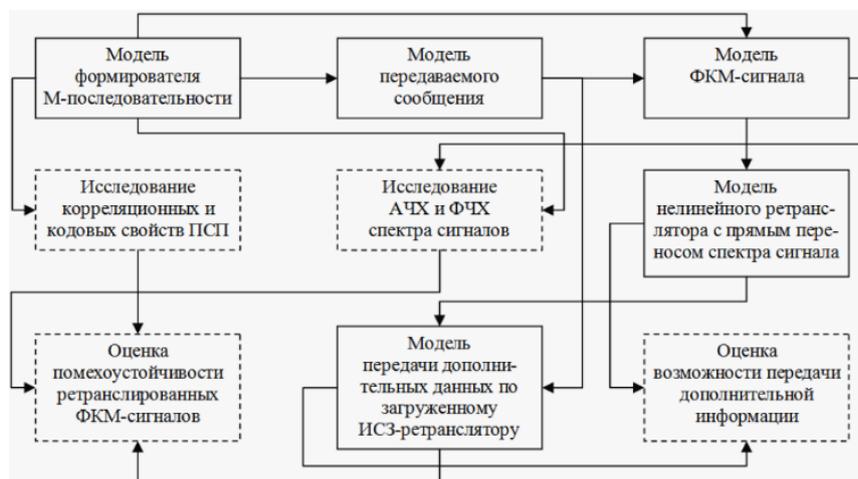


Рис. 3. Структура системы для моделирования передачи диагностирующих сигналов [6]

слятора, следовательно, использовать эту работу для оценки фазовых искажений сигнала при прохождении через БРК не представляется возможным. Рассмотрим ещё один аналог.

Научная статья [7], описывающая основные положения для построения компьютерной модели БРК с целью анализа искажений сигнала при его ретрансляции БРК. В этой работе рассматривается типовая структура современного многоступенчатого БРК, представленная на рис. 1. Работа описывает прохождение сигнала от передающей наземной станции к приёмной наземной станции через БРК.

Следует отметить, что структурная схема, представленная на рис. 1, соответствует исследуемой и рассматривается в [1, 5, 7].

Компьютерная модель БРК из научной статьи представлена на рис. 4.



Рис. 4. Структура компьютерной модели для оценки влияния параметров БРК на сигнал

В основе рассматриваемой работы поставлена задача формирования ряда требований, необходимых для корректного моделирования и дальнейшего применения этих исследований.

Структурная схема на рис. 4 описывает путь прохождения сигнала через БРК, и результатом исследования должен быть анализ вероятности появления ошибки в принятом сигнале.

Целью данной работы было формирование принципов построения корректной компьютерной модели тракта прохождения сигнала от одной НС к другой через БРК. Модель должна отражать физические принципы передачи сигнала и учитывать различные характеристики системы. Мы можем использовать в своей работе некоторые сформированные требования, поскольку разрабатываем модель только БРК. Поскольку в данной работе не реализовано моделирование, мы не можем выполнить исследования, используя готовую модель, и будем создавать свою.

2. Компьютерная модель бортового ретрансляционного комплекса для анализа фазовых искажений сигнала

Большинство элементов, используемых в ретрансляторах КА, имеют общие типовые элемен-

ты, которые искажают фазу сигнала. Основное влияние оказывают фильтры и усилители, они и будут рассмотрены более подробно.

Один из основных элементов бортового ретранслятора – это усилитель на лампе бегущей волны. Поскольку в данных усилителях основой является электронный поток, который модулируется по закону входного сигнала, такой усилитель меняет фазу сигнала. Типовые передаточные характеристики УЛБВ, используемые на современных космических аппаратах [8], и передаточная характеристика усилителя по модели Салеха (теоретическая) представлены на рис. 5.

Помимо амплитудных передаточных характеристик, рассматриваемых в [8], существуют также и фазовые передаточные характеристики, которые не анализируются в данном источнике.

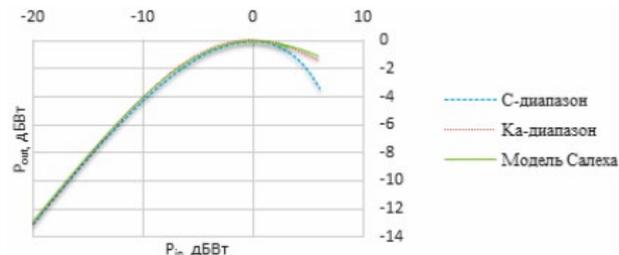


Рис. 5. Типовые амплитудные передаточные характеристики УЛБВ

В рамках нашей модели нам необходимо учесть набег фазы, создаваемый усилителем на ЛБВ, соответственно, данную модель мы не можем использовать, так как в ней рассматриваются только амплитудные передаточные характеристики.

Также существуют модели, где оцениваются искажения усилителей на ЛБВ при различных значениях частоты и напряжения пучка [9]. В результате данного исследования авторы показывают, что возможно создание усилителя на ЛБВ со стабильным сдвигом фазы, которое может найти широкое применение в радиолокации.

Данное исследование показывает, что в дальнейшем возможно создание фазостабильных усилителей на ЛБВ, но для нашей модели также не подходит, так как нам необходимо учитывать

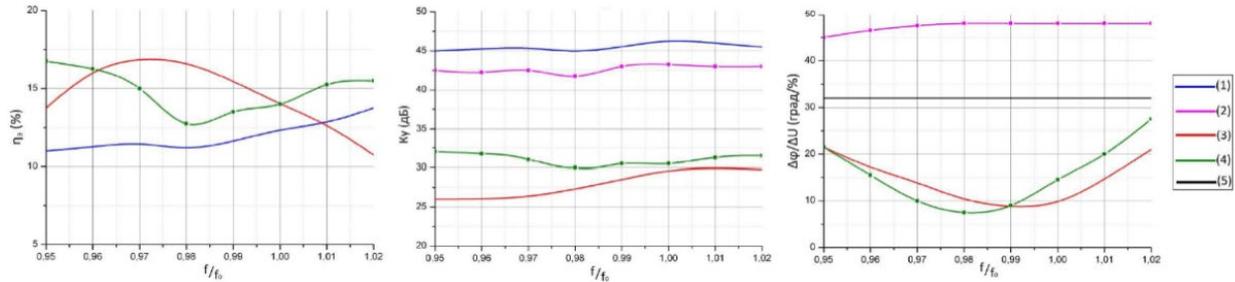


Рис. 6. Зависимости КПД, коэффициента усиления (K_u) и фазовой чувствительности ($\Delta\varphi/\Delta U$) от частоты (f/f_0): 1 – расчет; 2 – эксперимент для усилителя на ЛБВ; 3 – расчет; 4 – эксперимент экспериментального образца; 5 – расчет прибора с укороченной входной секцией

196

искажения, вносимые уже применяемыми усилителями.

Существуют разные модели, позволяющие выполнить аппроксимацию передаточных характеристик различных усилителей, которые рассматриваются в [10]. Для усилителей на ЛБВ наиболее подходящей является модель Салеха, разработанная А. Салехом [11]. Передаточные характеристики усилителя задаются двумя характеристиками – амплитудной (1) и фазовой (2).

$$G(A) = \frac{a_0 A}{1 + a_1 A^2}, \quad (1)$$

$$\varphi(A) = \frac{b_0 A^2}{1 + b_1 A^2}, \quad (2)$$

где a_0, a_1, b_0, b_1 – амплитудные и фазовые коэффициенты, A – амплитуда входного сигнала ($A = 1$ – точка насыщения).

На основе данных из [10, 11, 12] мы можем использовать эту модель для усилителя на ЛБВ, приняв соответствующие коэффициенты равными, получая СКО в 0,01 по амплитуде и 0,469 по фазе [10,13].

Данный метод нам подходит и позволяет учесть искажение фазы усилителем в составе модели, так как рассмотрена не только амплитудная передаточная характеристика, но и фазовая.

Поскольку современные усилители имеют твердотельные предусилители мощности, необходимо учесть их влияние на фазовые искажения. Для твердотельных усилителей хорошо подходит модель Горбани, описанная также в [10] и [13]. Модель описывается амплитудной (3) и фазовой (4) передаточными функциями.

$$G(A) = a_3 A + \frac{a_0 A^{a_1}}{1 + a_2 A^{a_1}}, \quad (3)$$

$$\varphi(A) = b_3 A + \frac{b_0 A^{b_1}}{1 + b_2 A^{b_1}}, \quad (4)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – амплитудные, а b_0, b_1, b_2, b_3 – фазовые коэффициенты передаточных функций нелинейных усилителей по модели Горбани. Будут использованы стандартные коэффициенты:

$a_0 = 8,1081; a_1 = 1,5413; a_2 = 6,5202; a_3 = -0,0718$ – для амплитудной и $b_0 = 4,6645; b_1 = 2,09565; b_2 = 10,88; b_3 = -0,003$ – для фазовой передаточной характеристики. Коэффициенты также впоследствии могут быть скорректированы для конкретного устройства.

Изучив общие принципы построения БРК в [1], был рассмотрен ряд публикаций на данные темы [5–13]. В основе компьютерной модели БРК лежит структурная схема, представленная на рис. 1, 2. Каждый блок раскрывается более подробно в соответствии с составом БРК, описанным в [1].

На рис. 7 приведена структурная схема приемного устройства.

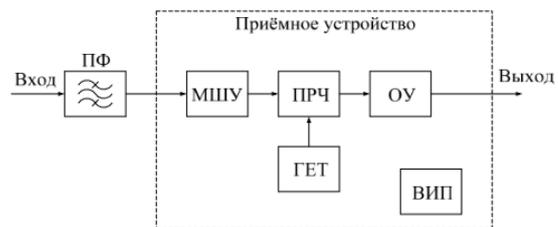


Рис. 7. Структурная схема приёмного устройства БРК

На входе ретранслятора стоит полосовой фильтр (ПФ) С-диапазона.

Приёмное устройство состоит из малошумящего усилителя (МШУ), преобразователя частоты (ПРЧ) с гетеродином (ГЕТ) и оконечного усилителя (ОУ). Источник вторичного питания не будет входить в состав данной модели, так как рассматривается только тракт прохождения сигнала. Вторичный источник питания (ВИП) в данной модели анализироваться не будет.

Далее по схеме после приёмного устройства сигнал поступает на входной мультиплексор, представленный на рис. 8.

В компьютерной модели мультиплексор реализован с помощью полосовых фильтров, подключенных параллельно. Гибридный делитель и ферритовые циркуляторы не учитываются согласно заданию.

Выходной мультиплексор также состоит из набора полосовых фильтров и будет смоделиро-

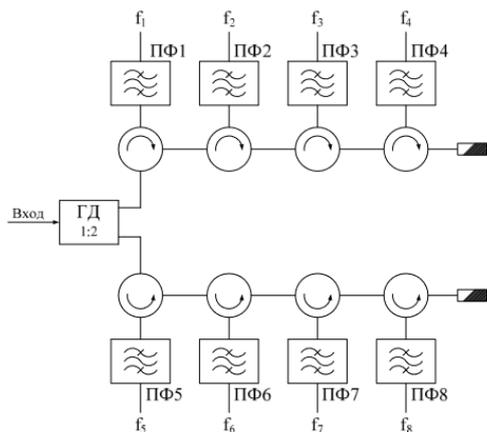


Рис. 8. Структурная схема типового мультиплексора в БРК на 8 каналов

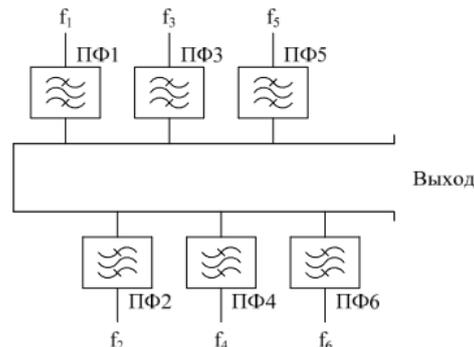


Рис. 9. Структурная схема выходного мультиплексора БРК

ван. Пример выходного мультиплексора показан на рис. 9.

Усилители мощности состоят из предусилителей на твердотельных элементах и усилителей мощности на лампе бегущей волны. Для оценки фазовых искажений будут использованы математические модели Горбани и Салеха соответственно.

Объединив всё изложенное, была разработана компьютерная модель БРК, представленная на рис. 10. Моделирование производилось в программной среде MATLAB R 2016b (Simulink). Далее приведено подробное описание всех элементов схемы и задаваемые параметры.

Для АМ/АМ и АМ/ФМ преобразования сигнала при прохождении через усилитель сигнал необходимо представить в комплексной форме. Реализован блок преобразования гармонических колебаний в комплексную форму, схема которого указана на рис. 11.

Схема рассчитана на гармоническое колебание на входе. Функция \arcsin определяет аргумент гармонического сигнала, далее из него формируются \sin и \cos составляющие путём сдвига

сигнала во времени на $\frac{T}{4}$ и умножения синусной

составляющей на мнимую единицу. После этого

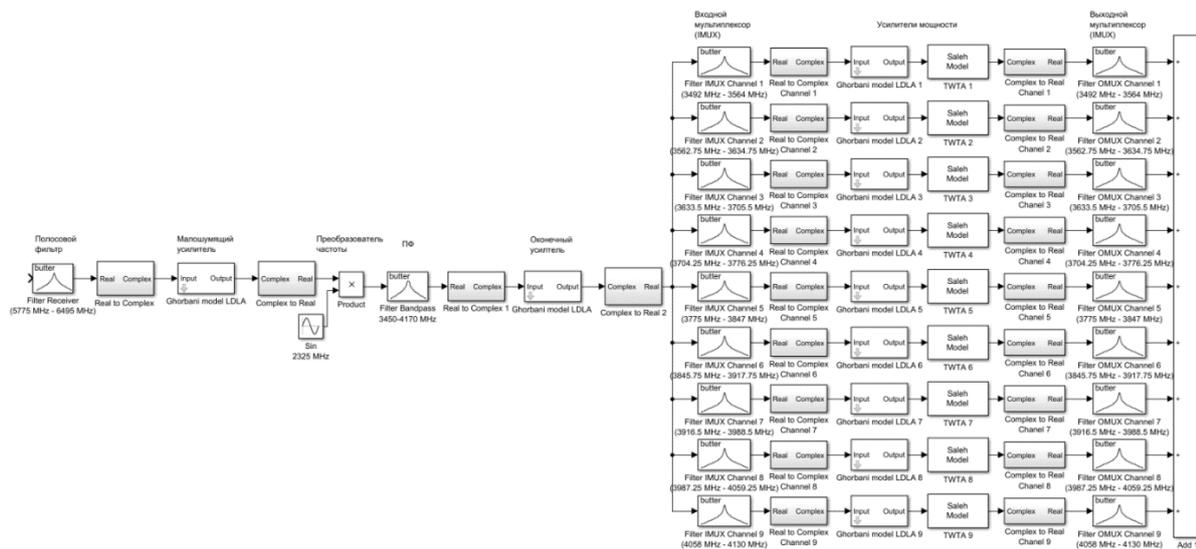


Рис. 10. Структурная схема компьютерной модели

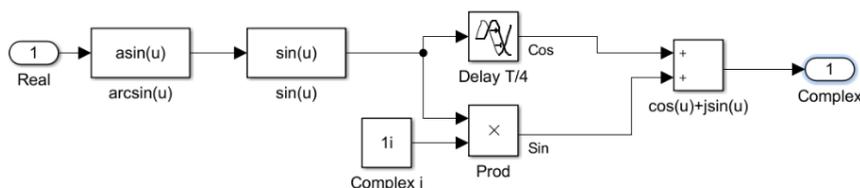


Рис. 11. Схема преобразования сигнала в комплексный вид

косинусные и синусные составляющие складываются, и полученный комплексный сигнал проходит дальше. Схема этого преобразования представлена на рис. 12.

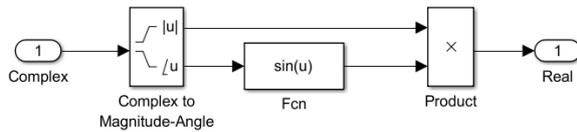


Рис. 12. Схема преобразования сигнала из комплексной формы в действительную

Входной гармонический комплексный сигнал поступает на блок «Complex to Magnitude-Angle», где вычисляется его модуль и аргумент, далее модуль сигнала умножается на синус его аргумента и на выходе остаётся только реальный гармонический сигнал.

Для исследования характеристик твердотельных усилителей мощности воспользуемся моделью Горбани. Схема для снятия переходных характеристик представлена на рис. 13.

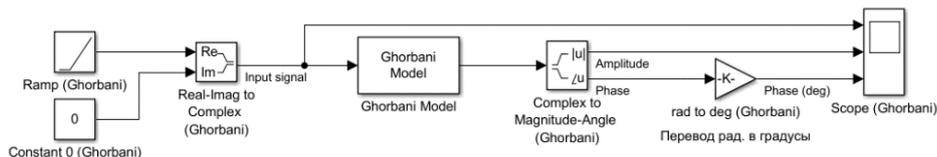


Рис. 13. Структурная схема исследования характеристик модели Горбани

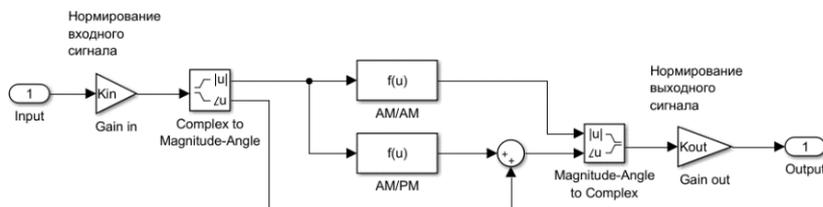


Рис. 14. Структурная схема исследования характеристик модели Горбани, реализованная через передаточные функции AM/AM и AM/ФМ

На входе данной схемы формируется комплексный сигнал. Действительная часть является амплитудой и линейно нарастает для получения передаточной функции. Мнимая часть равна нулю и соответствует фазе входного сигнала. Сформированный комплексный сигнал поступает на вход математической модели Горбани, описывающей УМ, построенные на твердотельных элементах. На выходе также получаем комплексный сигнал, из которого вычисляем его амплитуду и фазу. Для удобства восприятия значения фазы переведем в градусы, умножив на $\frac{180}{\pi}$.

На передаточных характеристиках встроенной готовой модели было замечено несоответствие графика AM/ФМ преобразования в области времени $0-25 \cdot 10^{-4}$, что соответствует

входной амплитуде $0-0,5 \cdot 10^{-3}$ В. Поэтому будет использована такая же модель, но собранная самостоятельно. Схема модели показана на рис. 14.

Коэффициенты передаточных функций идентичны встроенной в ПО модели, как и сами функции. Данные коэффициенты являются стандартными для исследования твердотельных усилителей и совпадают с рассмотренными в [10, 13]. Для нормирования входных и выходных амплитуд сигнала параметры K_{in} K_{out} объявлены переменными, что позволяет в дальнейшем при исследованиях менять их, не раскрывая каждый раз подробную схему усилителя.

Полученные передаточные характеристики исправленной модели Горбани соответствуют теоретическим, следовательно, ошибка встроенной модели исправлена.

Преобразователь частоты в компьютерной модели реализован с помощью перемножения входного гармонического колебания и стабильного колебания (гетеродина) с частотой 2325 МГц

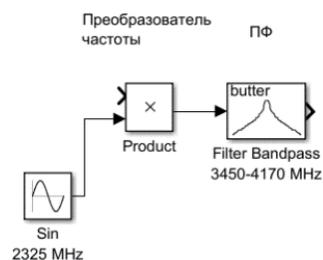


Рис. 15. Структурная схема преобразователя частоты

и полосовым фильтром на выходе для подавления комбинационных составляющих преобразователя частоты. Частота гетеродина 2325 МГц взята из технических характеристик структурно-функциональных блоков БРК, представленных в [1]. Схема преобразователя частоты приведена на рис. 15

Усилители на ЛБВ будут исследованы при помощи модели Салеха. Модель Салеха описывает движение электрически заряженных частиц под действием электрического поля в вакууме. Схема анализа передаточных характеристик модели Салеха представлена на рис. 16.

вый набег через всю систему БРК по ФЧХ и передаточным характеристикам.

Заключение

Таким образом, проведенный обзор анало-

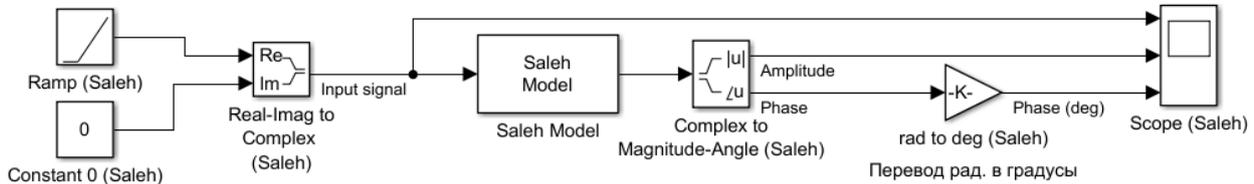


Рис. 16. Схема анализа передаточных характеристик модели Салеха

| № канала | F_n , МГц | F_b , МГц |
|----------|--|--|
| 1 | 3492 | $3492 + 72 = 3564$ |
| 2 | $3564 - 1.25 = 3562.75$ | $3564 - 1.25 + 72 = 3634.75$ |
| 3 | $3564 - 1.25 \cdot 2 + 72 = 3633.5$ | $3564 - 1.25 \cdot 2 + 72 \cdot 2 = 3705.5$ |
| 4 | $3564 - 1.25 \cdot 3 + 72 \cdot 2 = 3704.25$ | $3564 - 1.25 \cdot 3 + 72 \cdot 3 = 3776.25$ |
| 5 | $3564 - 1.25 \cdot 4 + 72 \cdot 3 = 3775$ | $3564 - 1.25 \cdot 4 + 72 \cdot 4 = 3847$ |
| 6 | $3564 - 1.25 \cdot 5 + 72 \cdot 4 = 3845.75$ | $3564 - 1.25 \cdot 5 + 72 \cdot 5 = 3917.75$ |
| 7 | $3564 - 1.25 \cdot 6 + 72 \cdot 5 = 3916.5$ | $3564 - 1.25 \cdot 6 + 72 \cdot 6 = 3988.5$ |
| 8 | $3564 - 1.25 \cdot 7 + 72 \cdot 6 = 3987.25$ | $3564 - 1.25 \cdot 7 + 72 \cdot 7 = 4059.25$ |
| 9 | $3564 - 1.25 \cdot 8 + 72 \cdot 7 = 4058$ | $3564 - 1.25 \cdot 8 + 72 \cdot 8 = 4130$ |

Рис. 17. Расчёт граничных частот ПФ мультиплексов

Выбраны стандартные для ЛБВ коэффициенты передаточных функций. В дальнейшем данные коэффициенты могут быть изменены на фактически измеренные для конкретного устройства.

При моделировании входного и выходного мультиплексов был взят частотный диапазон структурно-функциональных блоков БРК 3492 МГц – 4130 МГц [1]. Во всём диапазоне 9 каналов по 72 МГц, которые перекрываются между собой полосой в 1,25 МГц.

В таком случае расчёт граничных частот фильтров представлен на рис. 17.

При постоянной частоте и уровне входного сигнала мы можем определить его полный фазо-

гов [5–13] и анализ технических характеристик структурно-функциональных узлов БРК, представленных в [1], показал актуальность разработки. В результате создана компьютерная модель БРК в среде MATLAB R 2016b (Simulink) для анализа фазовых искажений сигнала, в состав которой вошли приёмное устройство, входной мультиплексор, усилитель мощности и выходной мультиплексор.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (номер FSRZ-2023-0008).

Список литературы

- [1] Орлов А.Г., Севастьянов Н.Н. Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) спутника связи. Принципы работы, построение, параметры / науч. ред. В. Н. Бранец. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 206 с.
- [2] Метод определения координат радиопередатчика с использованием геостационарного искусственного спутника Земли / А. С. Калашникова, В. В. Сухотин, О. В. Адмаев, Е. О. Смольников // Журнал Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 117–119.
- [3] Kalashnikova A.S., Sukhotin V.V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2. 10.1109/SIBCON.2015.7147083

- [4] Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет. 2012. 260 с.
- [5] Севастьянов Н. Н. Создание отечественных спутников связи «Ямал» // Доклады ТУСУРа. 2017. Т. 20, № 1. С. 149–153.
- [6] Буров Р. И., Илларионов Б. В., Малиев Д. С. Моделирование передачи диагностирующих сигналов через загруженный ретранслятор с нелинейной передаточной характеристикой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16, № 3. С. 79–86.
- [7] Зубов Т. А., Баскова А. А., Сухотин В. В. Формирование структуры компьютерной модели для оценки влияния параметров бортового ретрансляционного комплекса на сигнал // Космические аппараты и технологии. Ракетно-космическая техника. 2018. Т. 2 № 4. С. 192–197.
- [8] Сорокатый Р. Э., Яковлев А. Ю. Анализ нелинейных искажений сигналов в усилителях на лампах бегущей волны // Решетнёвские чтения, 2014. С. 34–36.
- [9] Кудряшов А. Г., Кудряшов В. П., Сивяков Б. К. Исследование характеристик фазостабильной лампы с бегущей волной // Вестник СГТУ. Физика, радиотехника и электроника. 2014. № 4. С. 55–60.
- [10] Гуревич В. Э., Егоров С. Г. Моделирование амплитудной характеристики радиотракта с кодовым разделением каналов // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 30–38. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-30-38.
- [11] Saleh A. A. M. Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers // IEEE Transactions on Communications. 1981. Vol. COM 29, № 11. pp. 1715–1720. DOI:10.1109/TCOM.1981.1094911.
- [12] White G. P., Burr A. G., Javornik T. Modelling of nonlinear distortion in broadband fixed wireless access systems // Electronics Letters. 2003. Vol. 39. Iss. 8. pp. 686–687. DOI:10.1049/el:20030462.
- [13] Ghorbani A. and Sheikhan M. The effect of solid state power amplifiers (SSPAs) nonlinearities on MPSK and M-QAM signal transmission // Sixth International Conference on Digital Processing of Signals in Communications. Loughborough, UK. 1991. pp. 193–197.

COMPUTER MODEL OF THE TRANSPONDER FOR THE ANALYSIS OF PHASE DISTORTIONS OF THE SIGNAL

A. V. Shagov, V. V. Sukhotin, T. A. Zubov

*Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russian Federation*

The article discusses issues related to the development of a computer model of an on-board relay complex with linear signal retransmission for the analysis of phase distortion of the signal. It is very important to know the phase distortion (foray) when determining the coordinates of the radio source by the phase method using a virtual antenna array in satellite communication systems. The literature review given in the article showed that it was not possible to conduct these studies on existing computer models. Based on the classical version of the block diagram of the on-board relay complex, a computer model was developed in the MATLAB R 2016b (Simulink) environment. The model includes a receiving device, an input and output multiplexer and power amplifiers. Mathematical models of Saleh and Gorbanni amplifiers implemented on traveling wave lamps and solid-state amplifiers, respectively, were taken as nonlinear amplifiers. Multiplexers are implemented in the form of bandpass filters connected in parallel. The hybrid divider and ferrite circulators were not included in the model. In the model, it is possible to investigate the dependence of the phase distortion of the signal on the characteristics of the structural blocks of the on-board relay complex. The computer model also provides for the possibility of studying the effect of noise on phase distortion.

Keywords: geostationary orbit, phase distortion, noise, model, transponder.

References

- [1] Orlov A. G., Sevastyanov N. N. On-board relay complex (DBK) of a communication satellite. Principles of operation, construction, parameters / scientific ed. V.N. Branets. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2014. 206 p.
- [2] A method for determining the coordinates of a radio transmitter using a geostationary artificial satellite of the Earth / A. S. Kalashnikova, V. V. Sukhotin, O. V. Admaev, E. O. Smolnikov // Journal of Successes of modern radio electronics. 2015. No. 10. pp. 117–119.
- [3] Kalashnikova A. S., Sukhotin V. V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. -Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2. 10.1109/SIBCON.2015.7147083
- [4] Tyapkin V. N., Garin E. N. Methods for determining the navigation parameters of mobile vehicles using the GLONASS satellite radio navigation system. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. 2012. 260 p.
- [5] Sevastyanov N. N. Creation of domestic communication satellites "Yamal" // Reports of TUSUR. 2017. Vol. 20. No. 1. pp. 149–153.
- [6] Burov R. I., Illarionov B. V., Maliev D. S. Modeling of transmission of diagnostic signals through a loaded repeater with a nonlinear transfer characteristic // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2020. Vol. 16. No. 3. pp. 79–86.
- [7] Zubov T. A., Baskova A. A., Sukhotin V. V. Formation of the structure of a computer model for assessing the influence of parameters of an on-board relay complex on the signal // Spacecraft and technologies. Rocket and space technology. 2018. Vol. 2. No. 4. pp. 192–197.
- [8] Sorokaty R. E., Yakovlev A. Yu. Analysis of nonlinear signal distortions in amplifiers on traveling wave lamps // Reshetnev Readings. 2014. pp. 34–36.
- [9] Kudryashov A. G., Kudryashov V. P., Sivyakov B. K. Investigation of the characteristics of a phase-stable traveling wave lamp // Bulletin of SSTU. Physics, radio engineering and electronics. 2014. No. 4. pp. 55–60.
- [10] Gurevich V. E., Egorov S. G. Modeling of the amplitude characteristics of a radio tract with code separation of channels // Proceedings of educational institutions of Communications. 2020. Vol. 6. No. 2. pp. 30–38. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-30-38.
- [11] Saleh A. A. M. Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers // IEEE Transactions on Communications. 1981. Vol. COM 29, № 11. pp. 1715–1720. DOI:10.1109/TCOM.1981.1094911.
- [12] White G. P., Burr A. G., Javornik T. Modelling of nonlinear distortion in broadband fixed wireless access systems // Electronics Letters. 2003. Vol. 39. Iss. 8. pp. 686–687. DOI:10.1049/el:20030462.
- [13] Ghorbani A. and Sheikhan M. The effect of solid state power amplifiers (SSPAs) nonlinearities on MPSK and M-QAM signal transmission // Sixth International Conference on Digital Processing of Signals in Communications. Loughborough, UK. 1991. pp. 193–197.

Сведения об авторах

Шагов Андрей Владимирович – студент 6-го курса СФУ. Область научных интересов: моделирование радиотехнических устройств.

Сухотин Виталий Владимирович – доцент СФУ, канд. техн. наук. Окончил КГТУ в 1999 году. Область научных интересов: измерения параметров сигналов в радиотехнике, радиотехнические методы измерения координат источников радиоизлучения.

Зубов Тимур Александрович – ассистент СФУ. Окончил СФУ в 2016 году. Область научных интересов: цифровые системы связи, встраиваемые системы и системы автоматизации.