

УДК 621.396.969.3

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-48-56>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Математическое моделирование сверхвысокочастотных каналов полуактивной радиолокационной головки самонаведения

Н.М. Легкий[@],
И.В. Унченко

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: legki@mirea.ru

Резюме

Цели. Радиолокационные головки самонаведения (РГСН) управляемых ракет – это большая группа радиолокаторов, которые в виду особенностей назначения отличаются от других радиолокаторов. Преимуществом полуактивной РГСН является возможность иметь мощный облучатель на командном пункте и, как следствие, мощный отраженный сигнал от цели, что в результате приводит к увеличению дальности ее обнаружения и точности наведения на цель. Отсутствие аппаратуры излучения упрощает бортовую аппаратуру управления ракеты, уменьшает ее вес и габариты и, следовательно, улучшаются ее маневренные свойства, что обуславливает наибольшее распространение данного типа РГСН. Для точного определения доплеровского смещения сигнала цели в приемный тракт полуактивной РГСН должен поступать эталонный сигнал, частота которого совпадает с частотой сигнала передатчика подсвета. Цель работы – оптимизация бортовой аппаратуры и подтверждение предлагаемого подхода с помощью моделирования.

Методы. В работе использованы методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и компьютерное моделирование в системе автоматизированного проектирования *AWR Design Environment*.

Результаты. Получена и проанализирована математическая модель приемника РГСН. Предложенная модель приемника позволяет произвести расчет спектральных характеристик сигналов в любой точке СВЧ-трактов, характеристик сигналов на входе основного канала, на выходе смесителя первого преобразования, на выходе селектора первой промежуточной частоты и на выходе приемного тракта. Приведены расчетные значения основных характеристик высокочастотных каналов.

Выводы. Полученная модель позволяет оценивать частотные зависимости основных параметров приемного тракта, таких как коэффициент передачи, коэффициент шума, точки децибелльной компрессии, точки пересечения интермодуляций третьего порядка. Полученные при моделировании значения максимально приближены к характеристикам существующих систем, т.к. в качестве основных элементов высокочастотных трактов использовались созданные модели реально существующих и массово используемых микросхем. Модель может использоваться для исследования путей совершенствования технических показателей, разработки новых принципов и схем построения радиоэлектронных комплексов, например, при построении приемного тракта с использованием перспективных средств радиофотоники.

Ключевые слова: полуактивная радиолокационная головка самонаведения, СВЧ-приемник, характеристики приемника, моделирование

• Поступила: 26.04.2023 • Доработана: 09.08.2023 • Принята к опубликованию: 15.02.2024

Для цитирования: Легкий Н.М., Унченко И.В. Математическое моделирование сверхвысокочастотных каналов полуактивной радиолокационной головки самонаведения. *Russ. Technol. J.* 2024;12(2):48–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-48-56>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Mathematical modeling of microwave channels of a semi-active radar homing head

Nikolay M. Legkiy[@],
Ivan V. Unchenko

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: legki@mirea.ru

Abstract

Objectives. Radar homing heads of guided missiles form a large group of radars which differ from other radars due to their specific purpose. The advantages of a semi-active radar homing head (SARH) include the ability to have a powerful irradiator at the command post and, as a result, a powerful reflected signal from the target. This results in an increase in the range of its detection and guidance. The absence of an emitter simplifies the missile's onboard control equipment, reduces its weight and dimensions, thereby improving its maneuverability and increasing the guidance accuracy, resulting in the greatest distribution of this type of SARH. However, in order to determine the exact Doppler shift of the target signal as part of SARH, a reference signal with a frequency coinciding with the illumination transmitter signal must be supplied to the receiving path. This study aims to synthesize and analyze the SARH receiver circuit with improved accuracy characteristics.

Methods. The following methods are used: statistical radio engineering; optimal signal reception theories; and computer modeling in CAD AWR Design Environment.

Results. A mathematical model of the SARH receiver was obtained and analyzed. The proposed receiver model allows the spectral characteristics of signals to be calculated at any point of the microwave paths, as well as signal characteristics at the input of the head channel, at the output of the first conversion mixer, at the output of the first intermediate frequency selector, and at the output of the receiving path. The calculated values of the main characteristics of high-frequency channels are also given.

Conclusions. The resulting model allows the frequency dependencies of main parameters of the receiving path, such as the gain factor, noise factor, decibel compression points, and third-order intermodulation intercept points to be estimated. The values obtained during the simulation are maximally close to existing systems, since the models of real-life and mass-used microcircuits thus created are used as the main elements when designing high-frequency paths. The model can be used to study methods of improving technical indicators, as well as to develop new principles and schemes for developing radioelectronic complexes, for example, when designing a receiving path using advanced radio photonics.

Keywords: semi-active radar homing head, microwave receiver, receiver characteristics, modeling

• Submitted: 26.04.2023 • Revised: 09.08.2023 • Accepted: 15.02.2024

For citation: Legkiy N.M., Unchenko I.V. Mathematical modeling of microwave channels of a semi-active radar homing head. *Russ. Technol. J.* 2024;12(2):48–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-48-56>**Financial disclosure:** The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные головки самонаведения (РГСН) управляемых ракет – это большая группа радиолокаторов, которые в виду особенностей назначения отличаются от других радиолокаторов [1–3]. Различают активные и полуактивные РГСН. Каждый вид имеет свои преимущества и недостатки. При активном самонаведении ракета с помощью РГСН облучает цель и принимает от нее часть отраженной энергии посредством одиночной антенны, активной [4] или цифровой [5] фазированной антенной решетки. Принятая информация (энергия) обрабатывается РГСН и выдается в виде сигналов управления автопилоту ракеты.

Преимуществом полуактивной РГСН является возможность иметь мощный облучатель на командном пункте и, как следствие, мощный отраженный сигнал от цели, что в результате приводит к увеличению дальности обнаружения и точности наведения на цель. Отсутствие генератора сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала упрощает бортовую аппаратуру управления ракеты, уменьшает ее вес и габариты, следовательно, улучшаются ее маневренные свойства. Это обусловило наибольшее распространение данного типа РГСН.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОЛУАКТИВНОЙ РГСН

Для обработки наиболее эффективных решений модулей РГСН используются различные пакеты и технологии моделирования [6–9].

Основная концепция полуактивных головок самонаведения заключается в том, что, поскольку почти все системы обнаружения и сопровождения содержат наземные радиолокационные системы, дублирование этого оборудования на самой ракете в некоторых случаях является избыточным. Для синхронизации аппаратуры РГСН в качестве опорного сигнала может использоваться сигнал наземной радиолокационной станции. Для определения доплеровского смещения сигнала цели в составе полуактивной РГСН в приемный тракт должен поступать опорный сигнал, частота которого совпадает с частотой сигнала передатчика подсвета. Решением этой

задачи является использование принятого специальной антенной прямого сигнала (опорного сигнала), распространяющегося от передатчика наземной радиолокационной станции в сторону РГСН. Для приема этого сигнала в состав полуактивной РГСН вводится специальный опорный приемник, усиливающий сигналы, принятые антенной опорного сигнала, ориентированной в заднюю полусферу ракеты – в сторону станции подсвета. Усиленный опорный сигнал используется для синхронизации гетеродина в РГСН или непосредственно как гетеродинный сигнал в приемном устройстве [10].

Функциональная схема исследуемого приемного устройства полуактивной РГСН приведена на рис. 1 [6]. Пусть станция подсвета излучает сигнал частотой f_0 . Частота $f_{o.k}$ сигнала, принимаемого опорным каналом, сдвигается вниз за счет эффекта Доплера при удалении ракеты от станции подсвета:

$$f_{o.k} = f_0 - \frac{V_r}{\lambda}, \quad (1)$$

где f_0 – частота сигнала станции подсвета, V_r – радиальная скорость ракеты, λ – длина волны опорного сигнала.

Частота сигнала цели, принимаемого опорным каналом, сдвигается вверх за счет встречного движения ракеты и цели:

$$f_{r.k} = f_0 + \frac{V_r}{\lambda} + \frac{V_t}{\lambda}, \quad (2)$$

где $f_{r.k}$ – частота отраженного от цели сигнала, принимаемая основным (главным) каналом; V_t – скорость цели.

Отраженный от цели и опорный сигналы преобразуются на первую промежуточную частоту с помощью сигнала общего первого гетеродина f_{r1} :

- первая промежуточная частота опорного канала

$$f_{o.k1} = f_0 - \frac{V_r}{\lambda} - f_{r1}, \quad (3)$$

- первая промежуточная частота основного канала

$$f_{r.k1} = f_0 + \frac{V_r}{\lambda} + \frac{V_t}{\lambda} - f_{r1}. \quad (4)$$

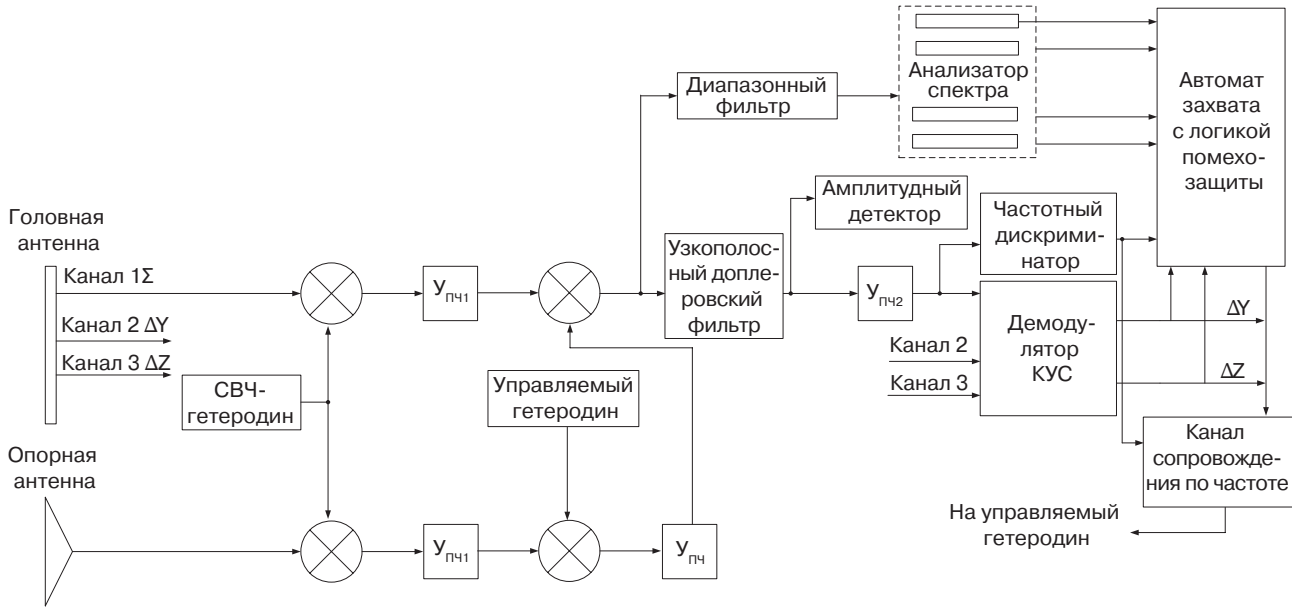


Рис. 1. Функциональная схема приемного устройства полуактивной РГСН.
КУС – канал углового сопровождения; $Y_{ПЧ}$, $Y_{ПЧ1}$, $Y_{ПЧ2}$ – усилители промежуточной частоты

Опорный сигнал $f_{o.k1}$ не может быть непосредственно использован как гетеродинный при дальнейшей обработке сигнала основного канала, т.к. в этом случае преобразование сигналов произойдет на низкие частоты, на которых обработка затруднена по схемотехническим причинам. Для того чтобы избежать этих проблем, опорный сигнал с помощью дополнительного управляемого гетеродина переносится на вторую промежуточную частоту. Частота сигнала управляемого гетеродина

$$f_{y.r} = f_{ПЧ2} + f_{ДП}, \quad (5)$$

где $f_{ПЧ2}$ – фиксированное значение, равное значению второй промежуточной частоты основного канала; $f_{ДП}$ – прогнозируемое значение доплеровской частоты сигнала цели, полученное от канала целеуказания или в результате сопровождения цели.

Вторая промежуточная частота опорного канала равна:

$$f_{o.k2} = f_0 - \frac{V_r}{\lambda} - f_{r1} + f_{ПЧ2} + f_{ДП}. \quad (6)$$

Сигнал $f_{o.k2}$ используется как гетеродинный при дальнейшем преобразовании сигналов основного канала в так называемом смесителе свертки, причем, поскольку частота $f_{o.k2}$ выше, чем $f_{r.k1}$, частота второго сигнала вычитается из частоты первого:

$$f_{r.k2} = f_{o.k2} - f_{r.k1} = f_{ПЧ2} + f_{ДП} - \frac{2(V_r - V_t)}{\lambda}. \quad (7)$$

Здесь $f_{r.k2}$ – частота сигнала второй промежуточной частоты основного канала, а действительное доплеровское смещение сигнала цели:

$$\frac{2(V_r - V_t)}{\lambda} = f_d. \quad (8)$$

Поскольку член f_d представляет собой действительное доплеровское смещение сигнала цели, сигнал после преобразования имеет частоту, смещенную относительно $f_{ПЧ2}$ на значение разности между прогнозируемым и действительным значениями доплеровской частоты, а при их равенстве попадает точно на $f_{ПЧ2}$. Это позволяет при обработке сигнала цели использовать узкополосный доплеровский фильтр, настроенный на фиксированное значение частоты $f_{ПЧ2}$, независимо от доплеровского смещения сигнала цели. Принцип работы и схемы построения РГСН более подробно описаны в [6].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-КАНАЛОВ ПОЛУАКТИВНОЙ РГСН

Для расчета характеристик СВЧ-каналов полуактивной РГСН, максимально приближенных к реальным, необходимо при моделировании использовать характеристики реально существующих микросхем и систем радиолокационных станций [11–17].

Применение модуля *Visual System Simulator (VSS)* системы автоматизированного проектирования и моделирования высокочастотных (ВЧ) систем

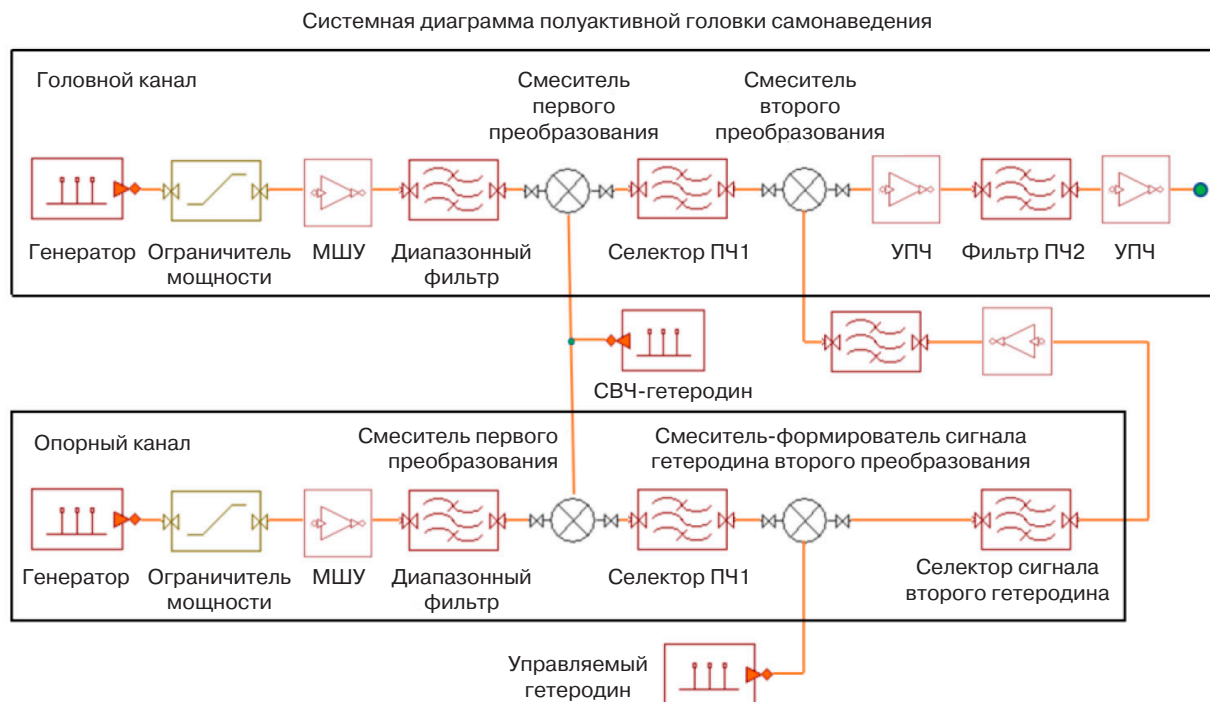


Рис. 2. Модель СВЧ-каналов полуактивной РГСН

и устройств *AWR Design Environment*¹ позволяет автоматизировать работы на этапе проектирования и рассчитать основные характеристики СВЧ-каналов. Разработанная в среде *VSS* модель СВЧ-каналов полуактивной РГСН представлена на рис. 2.

Первый функциональный блок приемного тракта РГСН – это входной ограничитель мощности. Он понижает уровень сигнала, поступающего в малощумящий усилитель (МШУ), до безопасного уровня. В качестве ограничителя мощности используется микросхема TGL2208-SM². Для достижения требуемого коэффициента передачи применяется многокаскадная схема построения приемного тракта. Каждый каскад усиливает поступающий на него сигнал в соответствии с его коэффициентом усиления G и имеет свой уровень шумов, который характеризуется коэффициентом шума F .

Формула для определения коэффициента шума каскадного усилителя приведена в [14] и имеет вид:

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \dots + \frac{NF_n - 1}{G_{n-1}}, \quad (9)$$

где NF – коэффициент шума, F_1 – коэффициент шума первого каскада, F_n – коэффициент шума n -го каскада, G_1 – коэффициент усиления первого каскада, G_n – коэффициент усиления n -го каскада.

Из формулы следует, что больший вклад в общий коэффициент шума вносят шумы первого каскада.

Кроме этого, общий коэффициент шума будет тем ниже, чем выше будет коэффициент усиления первого каскада.

Поскольку смесители, в которых происходит преобразование частоты, обладают достаточно интенсивными шумами, то самый первый каскад усиления (МШУ) выполняется еще до преобразования частоты, т.е. на несущей частоте. При моделировании в качестве МШУ были использованы параметры микросхемы QPA2609³.

Усилитель промежуточной частоты (УПЧ) обеспечивает максимальное усиление принимаемого сигнала. Именно УПЧ доводит уровень сигнала до значения, необходимого для нормальной работы средств обработки сигнала, тем самым обеспечивая необходимую чувствительность приемника. В качестве УПЧ использована микросхема PMA3-83LN+⁴.

Смеситель используется для переноса принятого сигнала несущей частоты на промежуточную. В качестве смесителя была выбрана микросхема HMC773ALC3B⁵.

При моделировании проведен расчет основных характеристик СВЧ-каналов – частотных зависимостей коэффициента передачи (S_{21}), коэффициента шума (NF), точки децибельной компрессии (OP1dB), точки пересечения интермодуляции третьего порядка (OIP3) при нормальных климатических условиях.

³ <https://www.qorvo.com/products/p/QPA2609>. Дата обращения 13.09.2023. / Accessed September 13, 2023.

⁴ <https://www.minicircuits.com/pdfs/PMA3-83LN+.pdf>. Дата обращения 13.09.2023. / Accessed September 13, 2023.

⁵ <https://www.micro-semiconductor.com/datasheet/46-HMC773ALC3B.pdf>. Дата обращения 13.09.2023. / Accessed September 13, 2023.

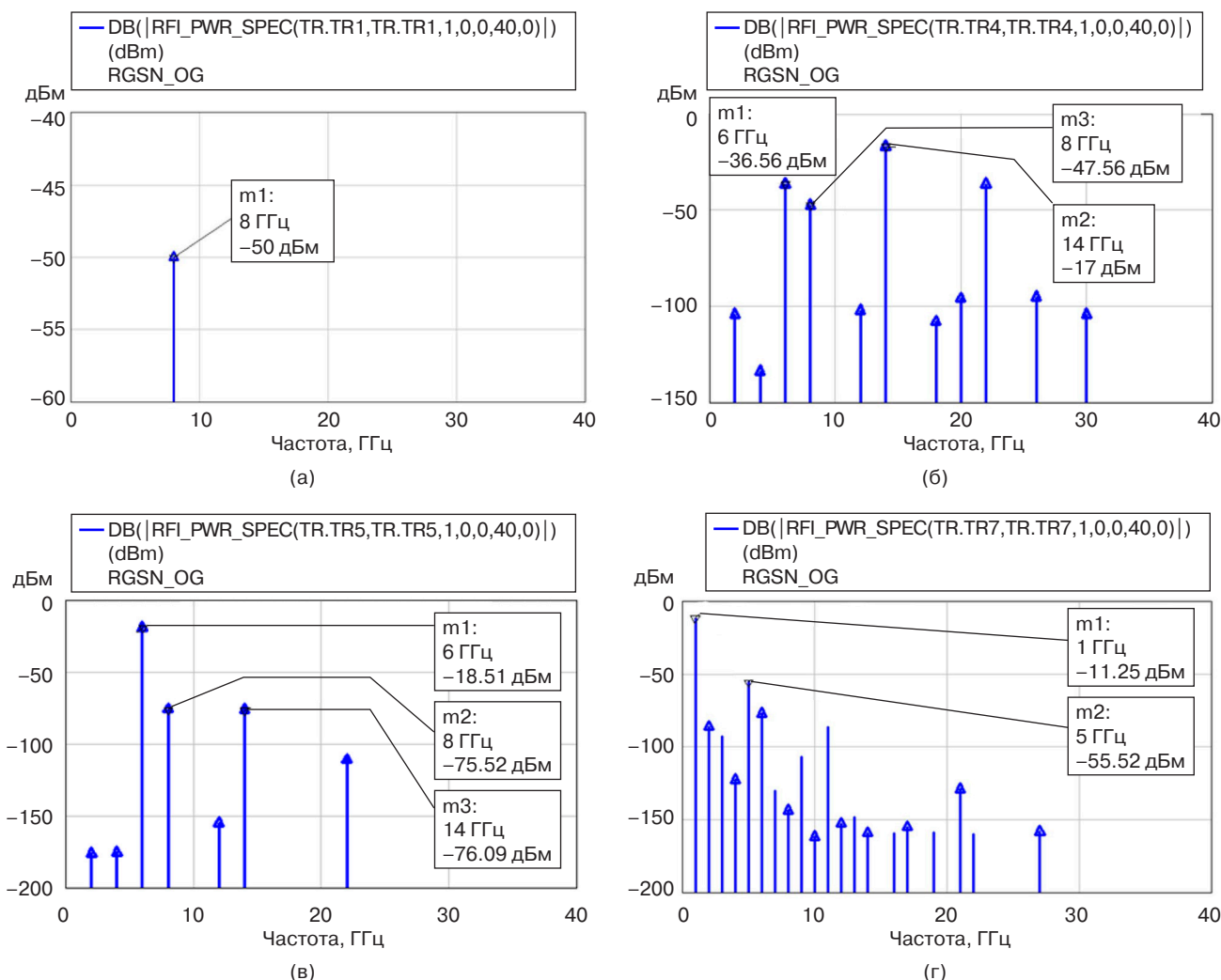


Рис. 3. Спектры сигналов: (а) на входе основного канала, (б) на выходе смесителя первого преобразования, (в) на выходе селектора первой промежуточной частоты, (г) на выходе приемного тракта

Для расчета основных параметров модели зададим рабочую частоту станции подсвета $F_{\text{под}}$ (8 ГГц), частоту отраженного от цели сигнала $F_{\text{отр}}$, частоту первого (опорного) СВЧ-гетеродина $F_{\text{г1}}$, а также частоту и ширину полосы обработки сигнала (1 ГГц). Сигналы $F_{\text{под}}$ и $F_{\text{отр}}$ формируются библиотечными моделями источников сигналов TONE и поступают на вход опорного и основного каналов соответственно, где, при необходимости, снижаются до безопасного уровня первым элементом приемного тракта – ограничителем мощности TGL2208-SM. Далее сигналы безопасного уровня поступают на вход МШУ QRA2609, затем – на вход диапазонного фильтра, который выделяет сигналы рабочего диапазона приемника. Сигналы с выхода диапазонного фильтра поступают на смесители первого преобразования, где смешиваются с сигналом СВЧ-гетеродина $F_{\text{г1}}$ и переносятся в спектр сигналов первой промежуточной частоты $F_{\text{ПЧ верх}}$ и $F_{\text{ПЧ ниж}}$ в верхнем головном канале и в нижнем опорном канале соответственно. Рабочая частота выделяется селектором

первой промежуточной частоты, полоса пропускания которого изменяется в соответствии с заданными уравнениями в зависимости от рабочей частоты станции подсвета $F_{\text{под}}$.

Сигнал $F_{\text{ПЧ ниж}}$, усиленный в УПЧ, с помощью управляемого гетеродина переносится смесителем-формирователем в спектр частот сигналов второго гетеродина $F_{\text{г2}}$. Рабочая частота выделяется селектором сигналов второго гетеродина, а в цепочке УПЧ уровень сигнала увеличивается до необходимого. Сигнал $F_{\text{г2}}$ поступает на гетеродинный вход смесителя второго преобразования, куда поступает и сигнал $F_{\text{ПЧ верх}}$, который переносится на частоту обработки сигнала.

Созданная модель позволяет провести расчет спектральных характеристик сигналов в любой точке СВЧ-трактов. Спектры сигналов на входе основного канала, на выходе смесителя первого преобразования, на выходе селектора первой промежуточной частоты и на выходе приемного тракта представлены на рис. 3. Расчетные значения основных характеристики ВЧ-каналов представлены на рис. 4.

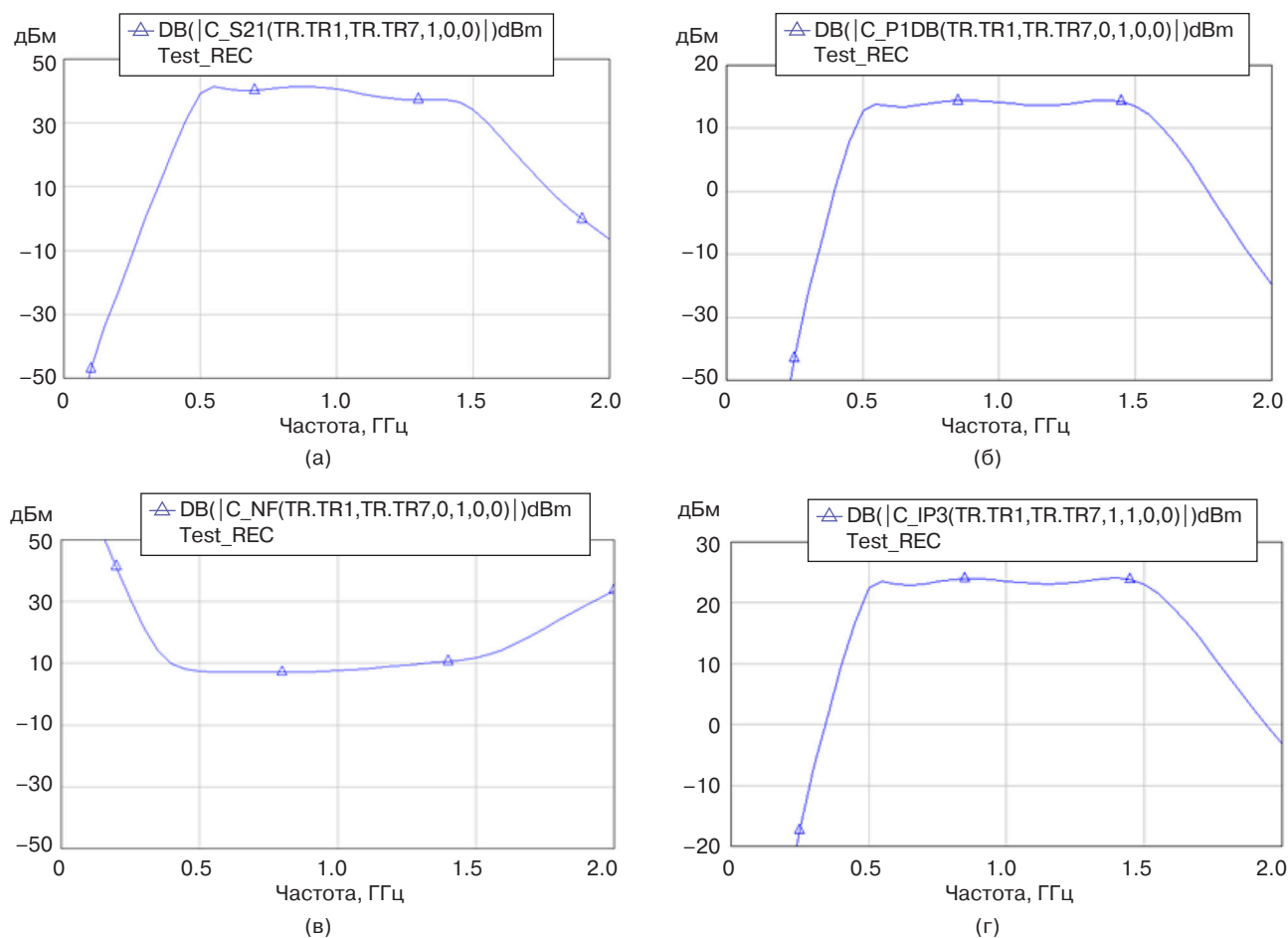


Рис. 4. Расчетные значения основных характеристики ВЧ-каналов: (а) коэффициент передачи основного канала S21, (б) OP1dB основного канала, (в) коэффициент шума NF, (г) OIP3

Проанализировав графики, приведенные на рис. 3 и 4, можно сделать вывод, что приемный тракт головного канала в конфигурации, приведенной на рис. 2, имеет коэффициент передачи не менее 38 дБ и обладает уровнем точки децибельной компрессии по выходу не менее 13 дБм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная модель позволяет оценивать частотные зависимости основных параметров приемного тракта, таких как коэффициент передачи, коэффициент шума, точки децибельной компрессии, точки пересечения интермодуляций третьего порядка. Значения, полученные при моделировании,

максимально приближены к показателям существующих систем, т.к. при построении ВЧ-трактов в качестве основных элементов использовались созданные модели реально существующих и массово используемых микросхем. Модель может использоваться для исследования путей совершенствования технических показателей, разработки новых принципов и схем построения радиоэлектронных комплексов (в частности, РГСН), например, при построении приемного тракта с использованием перспективных средств радиофотоники.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегтярева Е.Е., Локачева Ю.А., Судин А.П., Петушкевич Н.А., Недосекова Е.А. Радиолокационная головка самонаведения. В сборнике: *European Research: Сборник статей XXII Международной научно-практической конференции*. 2019. С. 19–21.
2. Горбачев М.А., Свистов В.В., Ульянова Е.А. Особенности работы активной ГСН при воздействии отражений от земной поверхности. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2021;4:25–35.
3. Pavlov V., Belousov O., Dorokhova T., Belyaev M., Trapeznikov E. Algorithm for controlling objects implementing a semi-passive guidance technique. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1901(1):012018. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012018>
4. Легкий Н.М., Унченко И.В. Формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. *Russ. Technol. J.* 2019;7(2):29–38. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38>
5. Чистяков В.А. Моноимпульсный радиопеленгатор с использованием цифровой антенной решетки. *Труды МАИ*. 2020;115:7. <https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-07>
6. Елизаров В.С., Чепкасов А.В. Имитация отраженного радиолокационного сигнала при полунатурном моделировании активной головки самонаведения. *Антенны*. 2013;1(188): 94–97.
7. Вексин С.И. *Цифровая обработка сигналов в доплеровских головках самонаведения*. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2018. 324 с.
8. Поркин А.Г. Моделирование приемо-передающих модулей АФАР в головке самонаведения ракет. *Аллея науки*. 2017;2(15):196–199.
9. Коновальцев Э.В., Линник А.П. Обоснование минимального объема выборки при малых количествах наблюдений для оценки характеристик авиационных средств поражения, оснащенных радиолокационными головками самонаведения. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2022;23:43–49.
10. Ильчук А.Р., Меркулов В.И., Панас А.И., Чернов В.С., Щербаков С.В. Анализ современного состояния и перспектив развития радиолокационных систем для управляемых средств поражения воздушных объектов. *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии (РЭНСИТ)*. 2021;13(3):227–244. <https://doi.org/10.17725/rensit.2021.13.227>
11. Муратов И.В. Математическая модель пеленгационной характеристики следающего координатора цели. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2013;11:34–38.
12. Двойрис Л.И., Иванов В.А., Галев К.В. Имитационная модель сигналов и помех для тестирования систем обнаружения. *Радиотехника*. 2020;84(2–4):14–19.
13. Волков В.В., Гордяскина Т.В. Исследование аналогового радиотехнического канала связи в программном пакете MATHCAD. В сборнике: *Великие реки – 2020: Труды 22-го международного научно-промышленного форума*. 2020. С. 94.
14. Дансмор Д.П. *Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей*; пер. с англ. М.: Техносфера; 2019. 736 с.
15. Иванников А.П., Иванников Д.А. Способ формирования и обработки широкополосных сигналов в радиолокаторах с антенными решетками. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2018;3(31):17–25.
16. Унченко И.В., Емельянов А.А. Модульная многопозиционная когерентная цифровая радиопотонная система. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):27–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37>
17. Шумов А.В., Нефедов С.И., Бикметов А.Р. Концепция построения радиолокационной станции на основе элементов радиопотоники. *Наука и Образование. Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2016;5:41–65.

REFERENCES

1. Degtyareva E.E., Lokacheva Yu.A., Sudin A.P., Petushkevich N.A., Nedosekova E.A. Homing Radar. In: *European Research. Collection of articles of the 22nd International Scientific and Practical Conference*. 2019. P. 19–21 (in Russ.).
2. Gorbachev M., Svistov V., Ulyanova E. The specifics of functioning of the active homing head exposed to ground surface clutter. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey" = Journal of "Almaz – Antey" Air and Space Defence Corporation*. 2021;4:25–35.
3. Pavlov V., Belousov O., Dorokhova T., Belyaev M., Trapeznikov E. Algorithm for controlling objects implementing a semi-passive guidance technique. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1901(1):012018. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012018>
4. Legky N.M., Unchenko I.V. Formation of the directional diagram in phased antenna array. *Russ. Technol. J.* 2019;7(2):29–38 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-29-38>
5. Chistyakov V.A. Monopulse radio direction finder using digital antenna array. *Trudy MAI*. 2020;115:7 (in Russ.). <https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-07>
6. Elizarov V.S., Chepkasov A.V. Simulation of radar signal reflection at half-nature modelling of the active homing head. *Antenny = Antennas*. 2013;1(188):94–97 (in Russ.).
7. Veksin S.I. *Tsifravaya obrabotka signalov v doplerovskikh golovkakh samonavedeniya (Digital signal processing in Doppler homing heads)*. Moscow: Bauman Press; 2018. 324 p. (in Russ.).
8. Porkin A.G. Modeling of transceiver modules AFAR the homing missiles. *Alleya nauki = Alleya-Science*. 2017;2(15):196–199 (in Russ.).

9. Konovaltsev E.V., Linnik A.P. Justification of the minimum sample size with small numbers of observations to assess the characteristics of aircraft weapons equipped with radar homing heads. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika = Aerospace Forces. Theory and practice*. 2022;23:43–49 (in Russ.).
10. Ilchuk A.R., Merkulov V.I., Panas A.I., Chernov V.S., Shcherbakov S.V. Analysis of the current state and development prospects of radar systems for guided weapons of air objects destruction. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye tekhnologii = Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies (RENSIT)*. 2021;13(3):227–244 (in Russ.). <https://doi.org/10.17725/rensit.2021.13.227>
11. Muratov I.V. Mathematical model of direction-finding characteristic of seeker. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2013;11:34–38 (in Russ.).
12. Dvoiris L.I., Ivanov V.A., Galev K.V. Simulation model of signals and interference for testing detection systems. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2020;84(2-4):14–19 (in Russ.).
13. Volkov V.V., Gordyaskina T.V. Research of analog radio technical communication channel in the MATHCAD software package. In: *Great Rivers – 2020. Proceedings of the 22nd International Scientific and Industrial Forum*. 2020. P. 94 (in Russ.).
14. Dunsmore J.P. *Nastol'naya kniga inzhenera. Izmereniya parametrov SVCh-ustroystv s ispol'zovaniem peredovykh metodik vektornogo analiza tsepei (The Engineer's Handbook. Microwave measurements using advanced vector network analysis techniques)*: transl. from Engl. Moscow: Tekhnosfera; 2019. 736 p. (in Russ.).
[Dunsmore J.P. *Handbook of Microwave Component Measurements with Advanced VNA Techniques*. Wiley; 2014. 735 p.]
15. Ivannikov A.P., Ivannikov D.A. Broadband signal generation and processing method in antenna array radars. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy = Radio Engineering and Telecommunications Systems*. 2018;3(31):17–25 (in Russ.).
16. Unchenko I.V., Emelyanov A.A. Photonics-based modular multistate digital coherent system. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):27–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-27-37>
17. Shumov A.V., Nefedov S.I., Bikmetov A.R. The concept of building a radar station based on the Microwave photonics components. *Nauka i Obrazovanie = Science & Education. Bauman Moscow State Technical University*. 2016;5:41–65 (in Russ.).

Об авторах

Легкий Николай Михайлович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой инженерной экологии техносферы, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: legki@mirea.ru. Scopus Author ID 56178415900, ResearcherID GWQ-9074-2022, SPIN-код РИНЦ 6636-6401, <http://orcid.org/0000-0003-1242-5113>

Унченко Иван Владимирович, преподаватель, кафедра инженерной экологии техносферы, Институт радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: unchenko@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 8819-1136, <https://orcid.org/0000-0002-6048-3476>

About the authors

Nikolay M. Legkiy, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of the Department of Engineering Ecology of the Technosphere, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: legki@mirea.ru. Scopus Author ID 56178415900, ResearcherID GWQ-9074-2022, RSCI SPIN-code 6636-6401, <http://orcid.org/0000-0003-1242-5113>

Ivan V. Unchenko, Teacher, Department of Engineering Ecology of the Technosphere, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: unchenko@mirea.ru. RSCI SPIN-code 8819-1136, <https://orcid.org/0000-0002-6048-3476>