

Труды МАИ. 2024. № 135
Trudy MAI, 2024, no. 135

Научная статья

УДК 621.396.4

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179693>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В X-ДИАПАЗОНЕ

Анатолий Анатольевич Генев¹, Владислав Вадимович Осипов²✉,
Сергей Васильевич Мацыкин³, Сергей Сергеевич Савилкин⁴

^{1,2}Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,
Москва, Россия

^{3,4}Московский авиационный институт (Национальный исследовательский
университет), Москва, Россия

¹ovv-42@mail.ru

²kt-mati@mail.ru✉

³msev2000@mail.ru

⁴savilkin@mail.ru

Аннотация. Использование в составе космического аппарата мультисервисных бортовых цифровых платформ и многолучевых антенн позволит реализовывать в X-диапазоне возможность организации высокоскоростной прямой связи абонентских земных станций друг с другом. В настоящей работе представлены результаты математического моделирования цифровых методов формирования амплитудно-фазового распределения (АФР) излучателей в X-диапазоне. Особенностью, рассматриваемого комплекса, являются цифровая обработка широкополосных

информационных сигналов в приемных и передающих трактах систем спутниковой связи и цифровые методы формирования диаграмм направленности (ДН) лучей.

Ключевые слова: диаграмма направленности, приемо-передающий тракт, амплитудно-фазовое распределение

Финансирование: работа выполнена в рамках НИР ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0003 «Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов»

Для цитирования: Генов А.А., Осипов В.В., Мацыкин С.В., Савилкин С.С. Математическое моделирование цифровых методов формирования амплитудно-фазового распределения излучателей в X-диапазоне // Труды МАИ. 2024. № 135.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179693>

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF DIGITAL METHODS FOR THE FORMATION OF THE AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTION OF EMITTERS IN THE X-BAND

Anatoly A. Genov¹, Vladislav V. Osipov²✉, Sergey V. Matsykin³, Sergey S. Savilkin⁴

^{1,2}Scientific Research Institute for Systems Research RAS,

Moscow, Russia

^{3,4}Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

¹ovv-42@mail.ru

²kt-mati@mail.ru✉

³msev2000@mail.ru

⁴savilkin@mail.ru

Abstract. The use of multi-service on-board digital platforms and multi-beam antennas as part of the spacecraft will make it possible to implement high-speed direct communication between subscriber earth stations in the X-band. In this article the results of mathematical modeling of digital methods for the generation of the emitters amplitude-phase distribution (APD) in the X-band. The complex special feature is the digital processing of broadband information signals in the receiving and transmitting paths and digital methods for generating rays polar diagram (PD).

The 16-channel receiving and transmitting sublattices (RTS), each consisting of 16 receiving and transmitting modules (PTM) combined with a single control unit, were used for the insurance of the specified technical requirements of the communication complex.

For the transmission path there are two separate beams with independent amplitude-phase distributions of signals in the opening of each sublattice.

For the receiving path there are also two separate beams with independent amplitude-phase distributions in the opening of each sublattice, and the diagram-forming circuits of the receiving beams in each module have common elements: low-noise amplifiers, mixers and intermediate frequency amplifiers, and the formation of beams for a given APD is carried out digitally after the ADC of the received signal on the second intermediate frequency.

The generation of the signals' amplitude-phase distribution in the opening of the sublattice for each of the two beams is carried out independently in the FPGA digitally at a

low frequency of 15 MHz received from the reference frequency block. For each beam in the FPGA, a group of 16 phase divider counters is used with individual control of the offset of the counting sequence in each counter, necessary for the formation of a predetermined amplitude-phase distribution of ray signals in the opening of the sublattice.

Digital phase control of the signals allows for strict phase binding to a single reference signal of the base frequency and eliminates the need for tuning elements that compensate for temperature instability, elements' aging and other problems of analog and digital phase shifters.

The mathematical model of the algorithm for generating a given APD of sublattice signals at a low frequency of 15 MHz in FPGAs was developed in the VHDL programming language.

In the mathematical model structure, the diagram-forming scheme of the transmission path, the generation block of a given amplitude-phase distribution is represented by a developed user program. All other blocks of the mathematical model of the transmission path are designed without the user programs by directly using standard procedures and functions included in libraries.

The simulation results verified the physical realizability of the receiving and transmitting sublattices in accordance with the specified functional schemes of the receiving and transmitting paths of the diagram-forming scheme.

Keywords: radiation pattern, transmit-receive channels, amplitude-phase distribution

Funding: Publication is made as part of the research for SRISA RAS on the topic No. FNEF-2024-0003

For citation: Genov A.A., Osipov V.V., Matsykin S.V., Savilkin S.S. Mathematical modeling of digital methods for the formation of the amplitude-phase distribution of emitters in the X-band. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179693>

Введение

Для обеспечения заданных технических требований комплекса связи используются 16-ти канальные приемно-передающие подрешетки (ППП), состоящие каждая из 16-ти приемно-передающих модулей (ППМ), объединенные единым блоком управления.

Передающий тракт должен иметь два отдельных луча с независимыми амплитудно-фазовыми распределениями (АФР) сигналов в раскрыве каждой подрешетки. Информационные сигналы передающих лучей формируются независимо (вне ППМ) на частотах L-диапазона с частотным разделением сигналов в заданной полосе частот передачи $\Delta f_{\text{ПРД ППМ}}$ и складываются в передающем тракте на малой мощности на входе линейных усилителей мощности (ЛУМ) ППМ после синтезаторов частот (СЧ), формирующих выходные сигналы лучей в X-диапазоне с заданным АФР[1,2,3].

Приемный тракт также должен иметь два отдельных луча с независимыми АФР в раскрыве каждой подрешетки, при этом диаграммо-образующие схемы 1-го и 2-го приемных лучей в каждом ППМ имеют общие элементы: малошумящие усилители (МШУ), смесители и усилители промежуточных частот (УПЧ), а формирование лучей для заданного АФР и расфилтровка информационных сигналов 1-го и 2-го

приемных лучей осуществляется в цифровой форме после АЦП принятого сигнала на второй промежуточной частоте (ПЧ).

Функциональная диаграммообразующая схема передающего тракта ППП

При формировании передающего тракта использовались цифровые методы формирования АФР в раскрыве подрешеток. Функциональная диаграммообразующая схема (ДОС) передающего тракта ППП представлена на рис. 1

Исходные входные информационные сигнала 1-го и 2-го передающих лучей поступают в передающие тракты ПППМ в качестве сигналов второго гетеродина в L-диапазоне.

Формирование АФР сигналов в раскрыве подрешетки для каждого из двух лучей осуществляется независимо в ПЛИС цифровым способом на низкой частоте 15 МГц, получаемой от блока опорных частот (БОЧ). Для каждого луча в ПЛИС используется группа из 16-ти счетчиков-делителей фазы с индивидуальным управлением смещением последовательности счета в каждом счетчике, необходимое для формирования, заданного АФР сигналов лучей в раскрыве подрешетки [4,5]. Опорная частота для счетчиков получается путем умножения эталонной частоты 15МГц с помощью синтезатора частоты, до частоты порядка 700 МГц, что позволяет сформировать 16 когерентных сигналов с заданными АФР на опорной частоте 15 МГц для каждого луча с дискретом регулировки фазы сигналов порядка $5 \div 10$ градусов.

Когерентные сигналы с частотой 15 МГц и заданными фазами поправок $\Delta\varphi$ для первого и второго лучей в каждом ПППМ, поступают на 1-е смесители

частоты, в которых осуществляется перенос частоты когерентных сигналов с заданными АФР в С-диапазон $f_{1\text{ПРД}}$..

В качестве 1-го гетеродина используются цифровые синтезаторы частот, опорной частотой для которых является сигнал 15 МГц от БОЧ.

В качестве 1-ого смесителя используются квадратурные двойные балансные смесители, позволяющие подавить нерабочие частоты преобразования фазовым методом без использования фильтров.

На выходах 1-х смесителей на частоте $f_{1\text{ПРД}}$ формируются по 16 немодулированных сигналов С-диапазона с заданным АФР для каждого луча, которые поступают на входы смесителей частоты, выполняющих две функции: перенос сигналов на рабочую несущую частоту Х-диапазона $f_{3\text{ПРД}}$ и модуляцию несущих информационным сигналом.

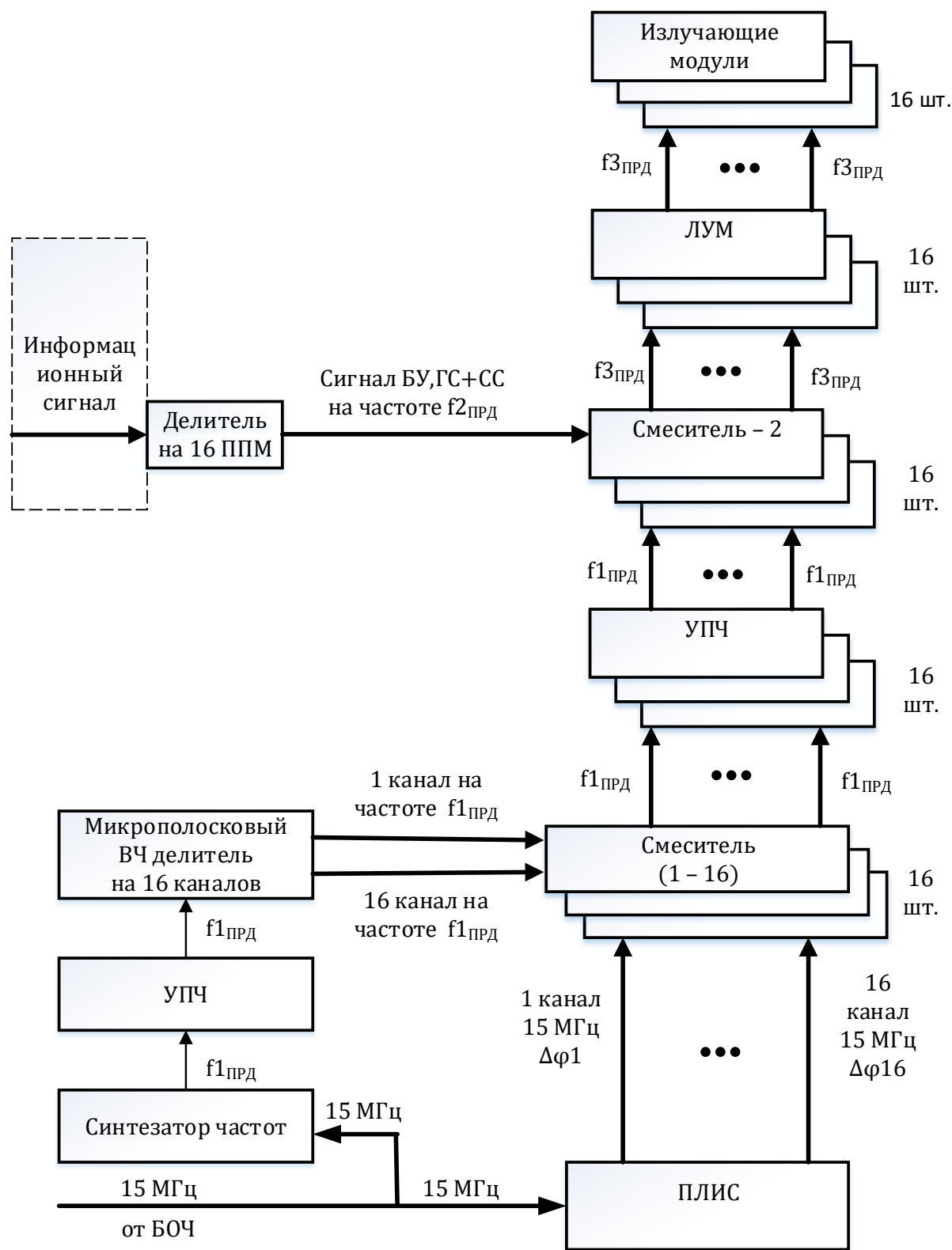


Рисунок 1 - Функциональная диаграммообразующая схема передающего тракта

ППП

На выходах смесителей с помощью фильтров выделяются когерентные сигналы двух лучей в X-диапазоне, сохраняющие заданное АФР. Далее сигналы 1-го и 2-го передающих лучей суммируются и поступают на входы ЛУМ каждого ППМ подрешетки.

Цифровое управление фазами сигналов позволяет обеспечить жесткую привязку фаз к единому опорному сигналу БОЧ и избавиться от необходимости в подстроечных элементах, компенсирующих температурную нестабильность, старение элементов и прочие проблемы аналоговых и цифровых фазовращателей.

Функциональная диаграммообразующая схема приемного тракта ППП

Функциональная ДОС приемного тракта ППП представлена на Рис. 2. Реализация диаграммообразующей схемы (ДОС) приемного тракта ППП дополнительно осложняется тем, что в первом приемном луче на входы ППМ поступают сигналы с псевдо случайной перестройкой рабочих частот (ППРЧ). Для входных сигналов лучей в ДОС используется двойное преобразование частот. Первая ПЧ выбрана в L-диапазоне ($f_{1пч}$). Первый преобразователь частоты включает смеситель и гетеродин в виде цифрового синтезатора частоты (СЧ) с фиксированным коэффициентом умножения. Опорным сигналом для СЧ является сигнал 15 МГц от БОЧ. Сигнал на первой ПЧ сохраняет ППРЧ в диапазоне частот $\Delta f_{ппрч}$ для сигналов 1-го луча.

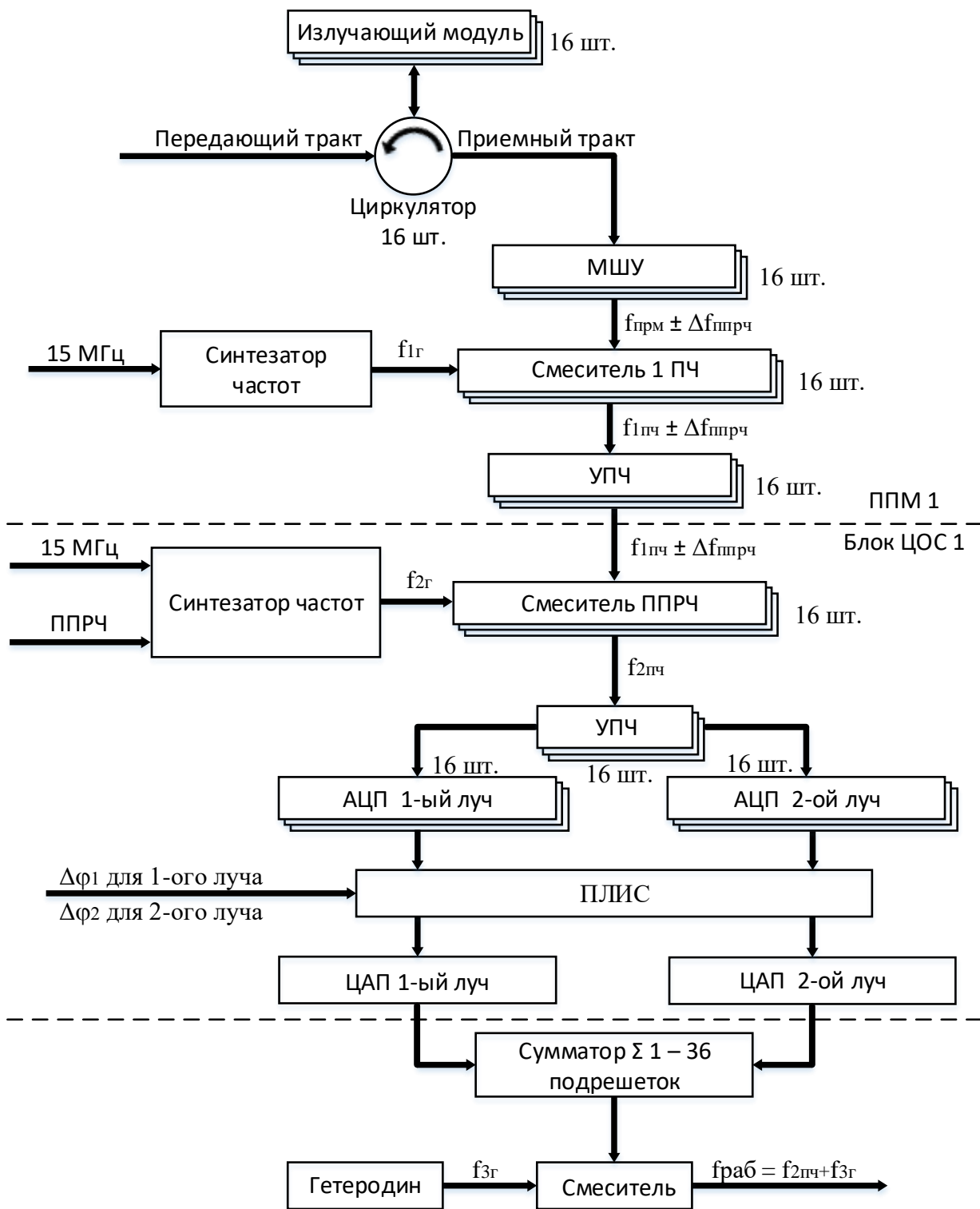


Рисунок 2 - Функциональная диаграммообразующая схема приемного тракта ППП

После усиления сигналов в первом УПЧ сигналы двух лучей поступают на второй преобразователь частоты, выполняющий две функции: преобразование сигналов на вторую ПЧ для сигнала 1-го и 2-го лучей и дополнительно снятие ППРЧ для сигналов 1-го луча. Для снятия ППРЧ сигналов 1-го луча в качестве второго гетеродина используется цифровой СЧ с управляемым по алгоритму ППРЧ коэффициентом умножения. Опорным сигналом для СЧ является сигнал 15 МГц от БОЧ. На выходе второго преобразователя частот формируются сигналы 1-го и 2-го лучей на второй промежуточной частоте $f_{2ПЧ}$ в фиксированной полосе без ППРЧ.

Сигналы на второй ПЧ поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с частотой дискретизации $2f_{2ПЧ}$. Цифровые коды с АЦП поступают в ПЛИС, где реализуется цифровой полосовой фильтр основной селекции сигналов 1-го и 2-го лучей и формирование цифровыми методами требуемого АФР сигналов 1-го и 2-го лучей в каналах ППП. Для этого цифровые коды каналов ППМ 1-го и 2-го лучей будут проходить через цифровые элементы задержки формирующие заданные АФР в раскрыве ППП для каждого луча. Управление длительностью задержки осуществляется с точностью до периода следования импульсов вырабатываемых внутренним синтезатором ПЛИС, формирующего частоты порядка 500÷700 МГц, что позволяет обеспечить дискрет регулировки фазы сигналов порядка 5÷10 градусов.

Сигналы на выходе ПЛИС с заданными фазами после цифро-аналогового преобразования в ЦАП подаются в аналоговом виде на вход сумматора объединяющего все сигналы ППМ для 1-го и 2-го лучей.

Общая структурная схема математической модели ДОС передающего тракта ППП

Наиболее сложным блоком математической модели ДОС передающего тракта ППП, блок–схема которой для 1-го луча представлена на Рис. 3, является блок формирования заданного АФР сигналов ППП на низкой частоте 15 МГц (блок 2), который функционально реализуется на базе программируемой логической интегральной схемы ПЛИС.

Математическая модель алгоритма формирования заданного АФР сигналов ППП на низкой частоте 15 МГц в ПЛИС была разработана на языке программирования VHDL [6,7]. Образованные в ПЛИС синтезаторы частоты должны обеспечивать умножение опорной частоты 15 МГц от БОЧ до частоты 500÷700 МГц, ограниченной быстродействием логических элементов ПЛИС.

После умножения указанная частота подается на 16 счетных входов групп счетчиков делителей (по числу каналов ППП). Каждый счетчик имеет возможность предварительной записи кода дополнения, определяющего смещение фазы $\Delta\varphi$ от которого будет начинаться счет. По этой причине переполнение счетчиков будет происходить в разные моменты времени в зависимости от величины записанного кода дополнения. Коэффициент деления фазы всех счетчиков должен быть одинаковым. В модели использовался код деления фазы 36, что соответствует дискрету установки фазы сигналов в АФР равному 10 градусам.

В структуре математической модели ДОС передающего тракта ППП, блок формирования заданного АФР (блок 2) представлен разработанной пользовательской программой.

Вторым по сложности блоком математической модели ДОС передающего тракта ППП является блок квадратурного смесителя (блок 3), выполненный в виде пользовательской программы.

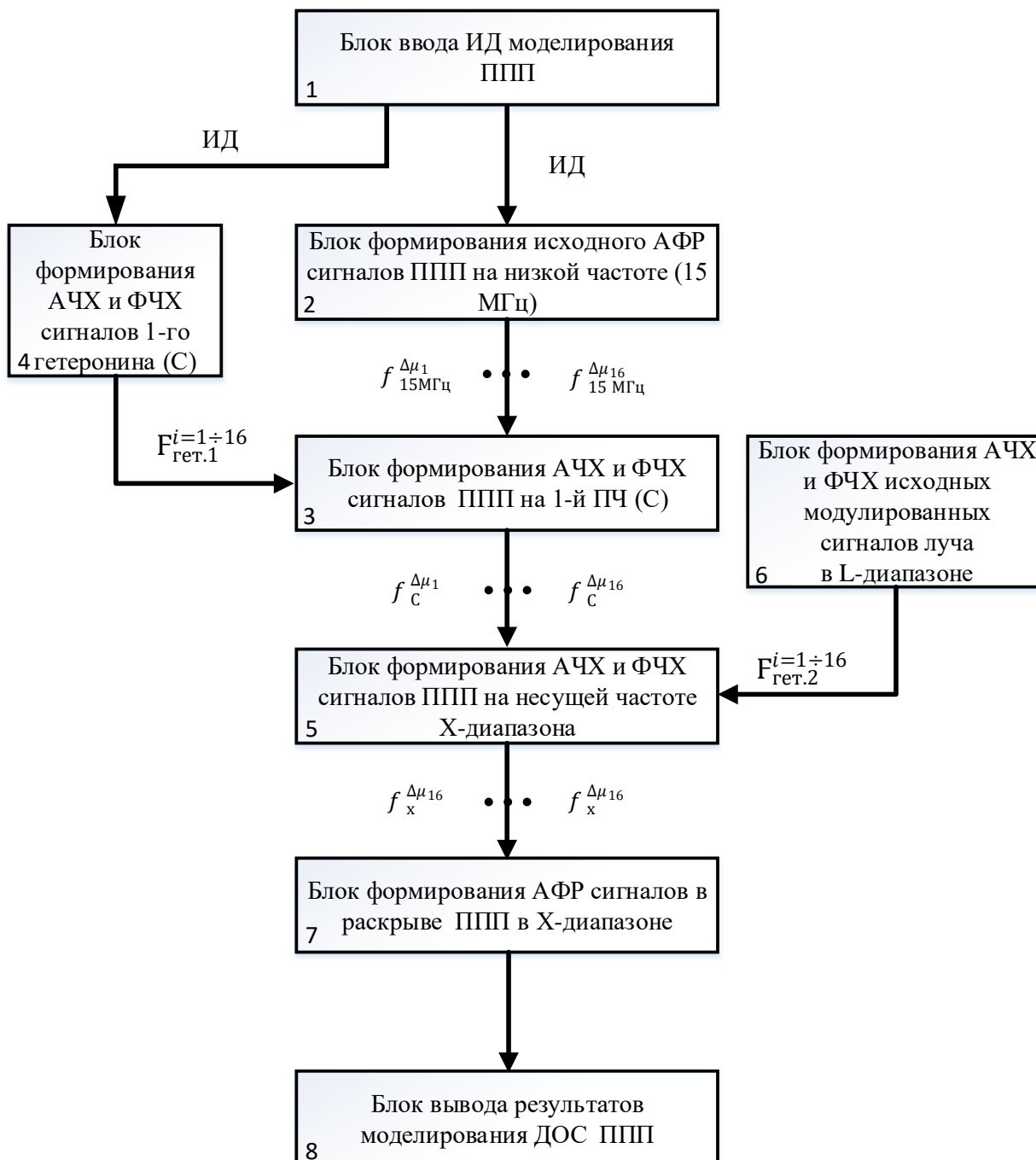


Рисунок 3 - Блок -схема математической модели ДОС передающего тракта ППП

Все остальные блоки математической модели ДОС передающего тракта ППП разработаны без оформления пользовательских программ путем непосредственного использования стандартных процедур и функций, входящих в библиотеки.

Общая структурная схема математической модели ДОС приемного тракта ППП

Блок-схема математической модели ДОС приемного тракта ППП представлена на Рис. 4. Наиболее сложными блоками модели ДОС приемного тракта ППП являются блоки 7 и 9.

В блоке 7 производится перенос сигналов 1-го и 2-го луча на 2-ю ПЧ и снятие ППРЧ для сигналов 1-го луча. Для снятия ППРЧ сигналов 1-го луча в функциональной схеме в качестве 2-го гетеродина используется цифровой синтезатор частот с управляемым по алгоритму ППРЧ коэффициентом умножения. В математической модели ДОС приемного тракта ППП для реализации соответствующей программы используется разработанная пользовательская программа, выполненная с использованием стандартных процедур и функций, входящих в библиотеки[8].

В блоке 9 производится селекция цифровых сигналов 1-го и 2-го луча ППП и формирование цифровых сигналов ППП с заданным АФР. Функционально эта задача решается с использованием ПЛИС, а в модели ДОС приемного тракта ППП для реализации соответствующей программы используется разработанная пользовательская программа на языке программирования VHDL.

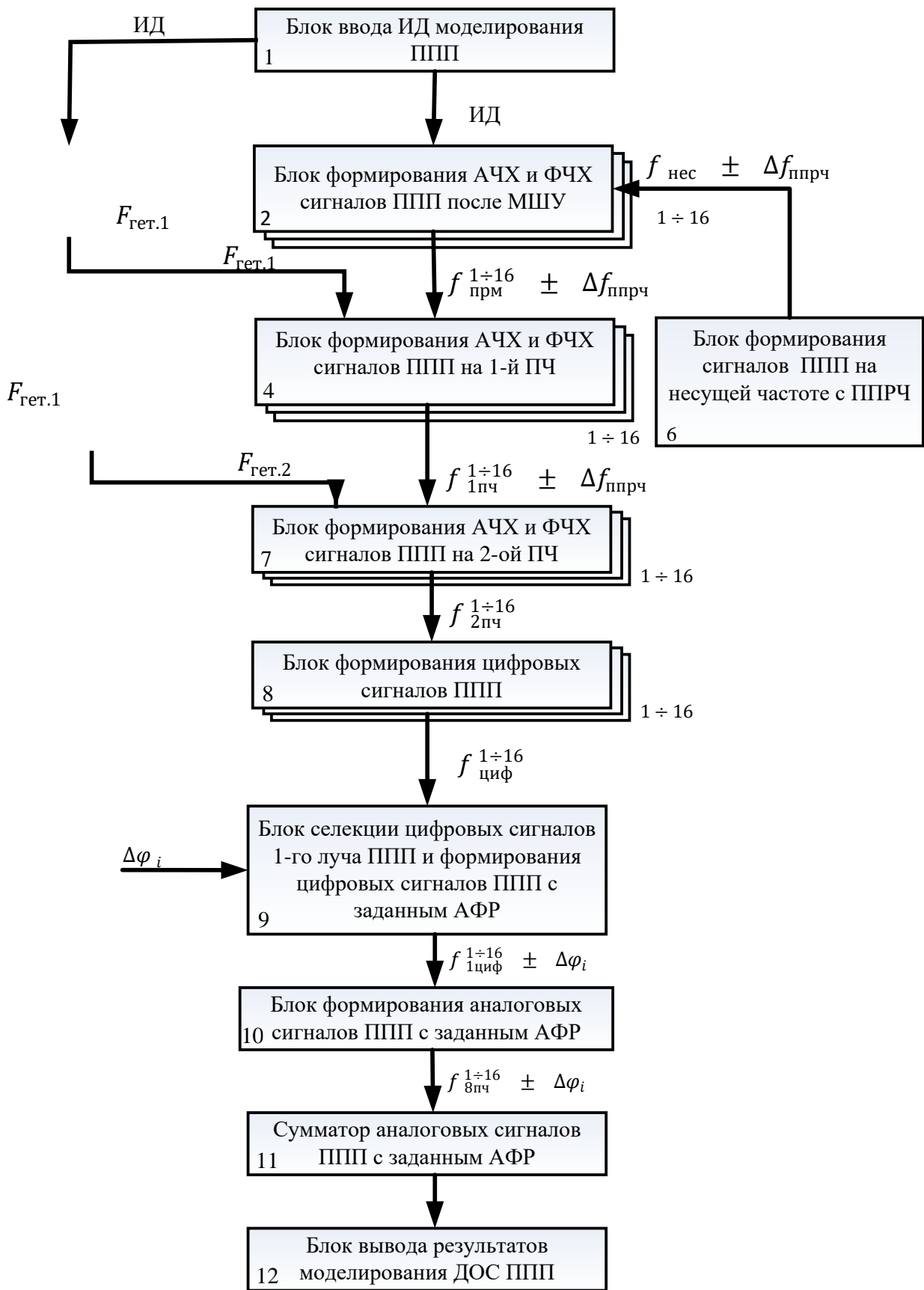


Рисунок 4 - Блок-схема математической модели ДОС приемного тракта ППП

Все остальные блоки математической модели ДОС приемного тракта ППП разработаны без оформления пользовательских программ, путем непосредственного использования стандартных процедур и функций, входящих в библиотеки.

Результаты математического моделирования ДОС передающего тракта ППП

Для простоты анализа результатов моделирования использовался вариант ППП в виде линейного ряда ППМ с фиксированным шагом расстановки равным 4см. в X-диапазоне ($f_{\text{ПРД}}=7,5$ ГГц).

В качестве исходного (расчетного) АФР в раскрые ППП задавались АФР соответствующие углу отклонения 1-го луча от нормали к оси ППП равному: 0, 5, 10, 15 градусов при равномерном по раскрыву амплитудном распределении. По результатам моделирования фиксировалось фактическое АФР в раскрые ППП.

Результаты моделирования представлены в Таблицах 1 - 4.

Угол отклонения луча 0 градусов

Таблица 1

№ ППМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
АР Расчет (мВт)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
АР Факт (мВт)	97	105	95	105	100	106	96	94	106	94	102	96	104	95	99	102
ФР Расчет (град.)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
ФР Факт (град.)	17	22	24	17	20	22	21	23	18	21	16	22	17	22	20	20

Среднее значение отклонения АР от заданного: - 0,25 мВт;

Среднеквадратичное отклонения АР: 4,36 мВт;

Дисперсия отклонения АР: 18,996;

Среднее значение отклонения ФР от заданного: 0,125 градуса;

Среднеквадратичное отклонения ФР: 2,38 градуса;

Дисперсия отклонения ФР: 5,672.

Угол отклонения луча 5 градусов

Таблица 2

№ ПИМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
АР Расчет (мВт)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
АР Факт (мВт)	94	102	96	104	95	99	102	97	105	93	105	99	106	96	94	106
ФР Расчет (град.)	0	31,39	62,79	94,18	125,58	156,975	188,37	219,365	251,16	282,555	313,95	345,345	16,74	48,185	79,53	110,985
ФР Факт (град.)	3	30	62	92	121	160	190	223	245	276	310	339	12	44	83	112

Среднее значение отклонения АР от заданного: - 0,437 мВт;

Среднеквадратичное отклонения АР: 4,55 мВт;

Дисперсия отклонения АР: 20,697;

Среднее значение отклонения ФР от заданного: -1,569 градуса;

Среднеквадратичное отклонения ФАР: 3,645 градуса;

Дисперсия отклонения ФР: 13,290.

Угол отклонения луча 10 градусов

Таблица 3

№ ПИМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
АР Расчет (мВт)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
АР Факт (мВт)	92	94	95	96	98	102	104	105	105	104	103	102	99	97	96	93
ФР Расчет (град.)	0	62, 496	124, 992	187, 488	249, 984	314, 448	16, 976	79, 472	141, 968	204, 464	266, 96	329, 456	31, 952	94, 448	156, 994	219 44
ФР Факт (град.)	2	66	124	184	252	313	13	75	144	202	264	324	29	95	155	215

Среднее значение отклонения АР от заданного: - 0,937 мВт;

Среднеквадратичное отклонения АР: 4,381 мВт;

Дисперсия отклонения АР: 19,193;

Среднее значение отклонения ФР от заданного: - 1.539 градуса;

Среднеквадратичное отклонения ФР: 2,583 градуса

Дисперсия отклонения ФР: 6,676.

Угол отклонения луча 15 градусов

Таблица 4

№ ПИМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
АР Расчет (мВт)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
АР Факт (мВт)	91	93	95	96	98	102	104	105	105	104	103	102	99	97	95	93
ФР Расчет (град.)	0	93, 168	186, 336	279, 504	12, 672	105, 84	199, 008	292, 176	25, 144	118, 512	211, 68	304, 848	38, 016	131, 184	224, 352	317, 525
ФР Факт (град.)	3	89	184	271	9	103	189	289	21	112	208	301	29	135	218	312

Среднее значение отклонения АР от заданного: -1,125 мВт;

Среднеквадратичное отклонения АР: 4,16 мВт;

Дисперсия отклонения АР: 17,3;

Среднее значение отклонения ФР от заданного: - 0,987 градуса;

Среднеквадратичное отклонения АР: 3,21 градуса

Дисперсия отклонения ФР: 10,28.

Результаты математического моделирования ДОС

приемного тракта ППП

Для упрощения анализа результатов моделирования использовался вариант ППП в виде линейного ряда ППМ с фиксированным шагом расстановки равным 4см. в X-диапазоне ($f_{\text{прд.}}=8$ ГГц).

В качестве исходного (расчетного) АФР в раскрые ППП задавались АФР соответствующие углу отклонения 1-го луча от нормали к оси ППП равному: 0, 5, 10, 15 градусов при равномерном по раскрыву амплитудном распределении. По результатам моделирования фиксировалось фактическое АФР в раскрые ППП.

Результаты моделирования представлены в Таблицах 5 - 8.

Угол отклонения луча 0 градусов

Таблица 5

№ ППМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
АР Расчет (мВт)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
АР Факт	105	93	102	103	100	98	103	106	103	106	95	97	99	109	92	93

(мВт)																
ФР Расчет (град.)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
ФР Факт (град.)	16	23	22	16	20	22	21	17	22	18	24	18	23	16	22	18

Среднее значение отклонения АР от заданного: 0,25 мВт;

Среднеквадратичное отклонения АР: 5,06 мВт;

Дисперсия отклонения АР: 25,549;

Среднее значение отклонения ФР от заданного: -0,125 градуса;

Среднеквадратичное отклонения ФР: 2,73 градуса;

Дисперсия отклонения ФР: 7,484.

Угол отклонения луча 5 градусов

Таблица 6

№ ПИМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
АР Расчет (мВт)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
АР Факт (мВт)	98	100	103	102	98	95	105	101	106	104	97	95	99	97	95	94
ФР Расчет (град.)	0	33, 484	66, 969	100, 454	133, 939	167, 423	200, 908	234, 393	267, 878	301, 363	334, 847	8, 332	41, 816	75, 300	108, 784	142, 268
ФР Факт (град.)	3	31	62	103	135	164	205	234	270	299	334	9	41	74	113	140

Среднее значение отклонения АР от заданного: -0,687 мВт;

Среднеквадратичное отклонения АР: 3,72 мВт;

Дисперсия отклонения АР: 13,839;

АР Факт (мВт)	98	96	95	98	106	103	103	104	101	101	96	97	98	95	96	99
ФР Расчет (град.)	0	99, 379	198, 758	298, 137	37, 516	136, 895	236, 275	335, 654	75, 033	174, 412	273, 791	13, 170	112, 550	211, 929	311, 308	50, 687
ФР Факт (град.)	4	96	196	295	35	134	234	332	76	176	276	15	115	214	315	55

Среднее значение отклонения АР от заданного:- 0,875 мВт;

Среднеквадратичное отклонения АР:3,35 мВт;

Дисперсия отклонения АР: 11,234;

Среднее значение отклонения ФР от заданного: 0,163 градуса;

Среднеквадратичное отклонения ФР: 2,876 градуса;

Дисперсия отклонения ФР: 8,273;

Заключение

Результаты моделирования подтверждают физическую реализуемость ППП в соответствии с заданными функциональными схемами приемного и передающего трактов ДОС.

Список источников

1. Глебов А.Л., Гурарий М.М., Жаров М.М., Егоров Ю.Б., Русаков С.Г., Стемповский С.Г., Ульянов С.Л. Актуальные проблемы моделирования в системах автоматизации схмотехнического проектирования. - М.: Наука, 2003. - 430 с.
2. Бабило П.Н. Основы языка VHDL: Учебное пособие. - М.: Книжный дом

Либроком, 2014. - 325 с.

3. Борисов В.И., Зинчук В.М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. - М.: РадиоСофт, 2015. - 260 с.

4. Верба В.С., Татарский Б.Г., Ильчук А.Р. и др. Радиолокационные системы авиационно-космического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства. - М.: Радиотехника, 2014. – 576 с.

5. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. – М.: Радиотехника, 2010. – 141 с.

6. Генев А.А., Осипов В.В., Савилкин С.Б. О возможности реализации мобильной сети спутниковой связи стандарта DVB-RCS с пространственно-частотно-временным разделением ресурса в X-диапазоне // Программные продукты и системы. 2013. № 4. С. 237–244.

7. Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства. – М.: Радио и связь, 1989. - 352 с

8. Звонарев В.В., Мороз А.В., Шерстюк А.В. Методика оценивания характеристик диаграммы направленности ультразвукового локатора в режиме синтезирования апертуры антенны // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=105683>

9. Тепликова В.И., Сенцов А.А., Ненашев В.А., Поляков В.Б. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетки // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=168189>. DOI: [10.34759/trd2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd2022-125-17)

10. Дементьев А.Н., Ключев Д.С., Новиков А.Н., Межнов А.С., Питерскова Ю.А.,

- Захарова Е.В., Дементьев Л.А. Развитие методов пространственновременной обработки широкополосных сигналов в адаптивной антенной решетке // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=167170>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-25)
11. Дементьев А.Н., Нефедов В.И., Трефилов Н.А., Блудов А.А. Помехозащищенность систем спутниковой связи с многолучевыми активными фазированными антенными решетками // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 11 (7). С. 6-12.
12. Журавлев А.К., Лукошкин А.П., Поддубный С.С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1983. – 240 с.
13. Шмачилин П.А., Шумилов Т.Ю. Матричная диаграммообразующая схема цифровой антенной решётки // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111382>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-12](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-12)
14. Кондратьева С.Г. Многофункциональная бортовая антенная решетка интегрированного радиоэлектронного комплекса // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29560>
15. Чистяков В.А. Система мониторинга угловых координат источников радиоизлучения для космических аппаратов спутниковой связи // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111394>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-15](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-15)
16. Чистяков В.А. Алгоритм адаптивной фильтрации помех в цифровых антенных решетках спутниковой связи // Труды МАИ. 2019. № 105. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=104239>

17. Орешкин В.И., Мелёшин Ю.М., Цветков В.К. Повышение точности пеленга сигнала в цифровой антенной решётке // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=161424>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-10)
18. Меркулова Ж.В., Орешкин В.И., Цветков В.К. Компенсация амплитуднофазового разброса в цифровой антенной решётке // Естественные и технические науки. 2017. № 5 (107). С. 185-188.
19. Орешкин В.И., Лялин К.С., Максимовская А.И., Меркулова Ж.В., Чистюхин В.В. Влияние способа получения квадратурных компонент сигнала на характеристики антенной решетки с цифровым формированием луча // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2016. Т. 21. № 3. С. 254-260.
20. Джиган В.И., Курганов В.В. Калибровка цифровых антенных решёток с помощью алгоритмов адаптивной обработки сигналов // Телекоммуникации. 2021. № 2. DOI: [10.31044/1684-2588-2021-0-2-8-16](https://doi.org/10.31044/1684-2588-2021-0-2-8-16)

References

1. Glebov A.L., Gurarii M.M., Zharov M.M., Egorov Yu.B., Rusakov S.G., Stempkovskii S.G., Ul'yanov S.L. *Aktual'nye problemy modelirovaniya v sistemakh avtomatizatsii skhemotekhnicheskogo proektirovaniya* (Recent problems of modelling in schematic design automation systems), Moscow, Nauka, 2003, 430 p.
2. Babilo P.N. *Osnovy yazyka VHDL* (Basics of the VHDL language), Moscow, Knizhnyi dom Librokom, 2014, 325 p.

3. Borisov V.I., Zinchuk V.M. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi. Veroyatnostno-vremennoi podkhod* (Noise immunity of radiocommunication systems. The probabilistic-time approach), Moscow, RadioSoft, 2015, 260 p.
4. Verba B.C., Tatarskii B.G., Il'chuk A.R. et al. *Radiolokatsionnye sistemy aviatsionno-kosmicheskogo monitoringa zemnoi poverkhnosti i vozdushnogo prostranstva* (Radar systems of aerospace monitoring of the Earth's surface and airspace), Moscow, Radiotekhnika, 2014, 576 p.
5. Grigor'ev L.N. *Tsifrovoe formirovanie diagrammy napravlenosti v fazirovannykh antennykh reshetkakh* (Digital forming of polar diagram in phased antenna arrays), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 141 p.
6. Genov A.A., Osipov V.V., Savilkin S.B. *Programmnye produkty i sistemy*, 2013, no. 4, pp. 237–244.
7. Kocherzhevskii G.N., Erokhin G.A., Kozyrev N.D. *Antenno-fidernye ustroistva* (Antenna-feeder devices), Moscow, Radio i svyaz', 1989, 352 p.
8. Zvonarev V.V., Moroz A.V., Sherstyuk A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105683>
9. Teplikova V.I., Sentsov A.A., Nenashev V.A., Polyakov V.B. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=168189>. DOI: [10.34759/trd2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd2022-125-17)
10. Dement'ev A.N., Klyuev D.S., Novikov A.N., Mezhnov A.S., Piterskova Yu.A., Zakharova E.V., Dement'ev L.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=167170>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-25)

11. Dement'ev A.N., Nefedov V.I., Trefilov N.A., Bludov A.A. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 11 (7), pp. 6-12.
12. Zhuravlev A.K., Lukoshkin A.P., Poddubnyi S.S. *Obrabotka signalov v adaptivnykh antennykh reshetkakh* (Signal processing in adaptive antenna arrays), Leningrad, Izd-vo Leningradskogo universiteta, 1983, 240 p.
13. Shmachilin P.A., Shumilov T.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111382>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-12](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-12)
14. Kondrat'eva S.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29560>
15. Chistyakov V.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111394>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-15](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-15)
16. Chistyakov V.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104239>
17. Oreshkin V.I., Meleshin Yu.M., Tsvetkov V.K. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=161424>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-10)
18. Merkulova Zh.V., Oreshkin V.I., Tsvetkov V.K. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 5 (107), pp. 185-188.
19. Oreshkin V.I., Lyalin K.S., Maksimovskaya A.I., Merkulova Zh.V., Chistyukhin V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 254-260.
20. Dzhigan V.I., Kurganov V.V. *Telekommunikatsii*, 2021, no. 2. DOI: [10.31044/1684-2588-2021-0-2-8-16](https://doi.org/10.31044/1684-2588-2021-0-2-8-16)

Статья поступила в редакцию 10.01.2024

Одобрена после рецензирования 15.01.2024

Принята к публикации 26.04.2024

The article was submitted on 10.01.2024; approved after reviewing on 15.01.2024; accepted for publication on 26.04.2024