

УДК 621.396.96

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИЁМНОЙ ЧАСТИ АФАР

В. И. Протасов, начальник отдела АО «НИИ Приборостроения им. В. В. Тихомирова», Жуковский, Россия;
orcid.org/0009-0001-4223-5049, e-mail: protasov.v@nio9.niip.ru

Рассматривается задача разработки и исследования математической модели приёмной части активной фазированной антенной решётки (АФАР). Целью работы является создание математической модели для расчёта шумовых и динамических параметров АФАР, необходимых при проектировании сквозного приёмного канала радиотехнических систем. Задачей данной работы является выявление зависимости шумовых и динамических характеристик АФАР от формы амплитудного распределения по раскрытию антенной решётки. Исследована проблема расчёта коэффициента шума и коэффициента усиления на стадии проектирования АФАР. Получена математическая модель, которую можно использовать как для предварительного расчёта чувствительности всего приёмного канала, так и для сравнения расчётных значений с данными, получаемыми в ходе экспериментальных исследований. Проведён анализ результатов расчёта коэффициента шума сквозного приёмного канала классическим методом и с использованием разработанной модели.

Ключевые слова: АФАР, ФАР, РЛС, коэффициент шума, шум, амплитудное распределение, математическая модель, динамический диапазон, отношение сигнала к шуму, чувствительность.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-13-20

Введение

Проблемам математического моделирования антенных систем для расчёта их параметров посвящено значительное количество работ. Методы моделирования электродинамических характеристик (коэффициент направленного действия, ширина главного луча диаграммы направленности, уровень боковых лепестков, изменения характеристик в зависимости от угла отклонения луча) хорошо изучены и широко применяются на практике [1-3].

При разработке РЛС на основе пассивных фазированных антенных решёток разработчики антенных систем не рассматривают вопросы, связанные параметрами приёмного тракта – коэффициентом шума и динамическим диапазоном. В случае с АФАР происходит переход от одноканального к многоканальному МШУ [4, 5]. Поэтому АФАР становится частью сквозного приёмного канала, которая определяет его шумовые и динамические характеристики. Если ранее [6] для определения предельной чувствительности приёмной системы требовались параметры одного МШУ, то в АФАР таких каналов, включённых параллельно, может быть несколько тысяч.

Таким образом, на стадии проектирования актуальна задача определения шумовых и динамических характеристик приёмной части АФАР, что, в свою очередь, необходимо для расчёта сквозного приёмного канала РЛС. Особое внимание уделено изменению этих характеристик при различных амплитудных распределениях по раскрытию антенной решётки.

Математическая модель шумовых и динамических характеристик приёмопередающего модуля АФАР

Представим математическую модель приёмной части АФАР как набор компонентов и их взаимосвязей, поэтому синтез функциональной модели начнём с моделирования входящих узлов. Элементарным узлом АФАР является активный приёмно-передающий модуль (ППМ). Типовая структурная схема приёмного канала ППМ приведена на рисунке 1 [7-9].

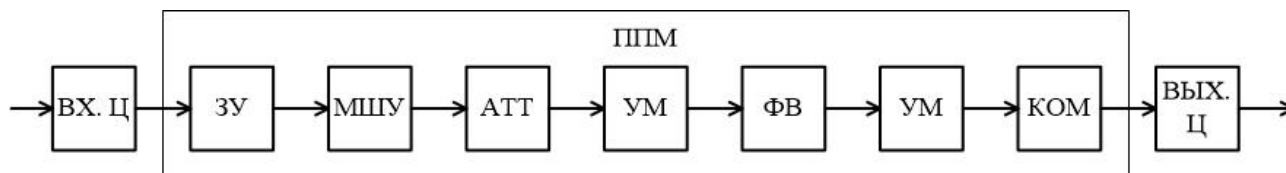


Рисунок 1 – Структурная схема приёмного канала ППМ

Figure 1 – Structure diagram of TRM receiver channel

На рисунке 2: ВХ. Ц – входные цепи, ЗУ – защитное устройство, МШУ – малошумящий усилитель, АТТ – управляемый аттенуатор, УМ – усилитель мощности, ФВ – управляемый фазовращатель, КОМ – коммутатор, ВЫХ.Ц – выходные цепи.

Разработаем математическую модель приёмо-передающего модуля. Входные и выходные данные разрабатываемой математической модели приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Входные и выходные данные математической модели ППМ

Table 1 – Input and output data of TRM mathematical model

<p>Входные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> – $K_{шi}$ – коэффициент шума i-го каскада; – K_{yi} – коэффициент усиления i-го каскада; – $P_{линi}$ – верхняя граница линейности i-го каскада по выходу; – ΔF – сквозная полоса; – $L_{вх}$ – потери во входных цепях ППМ
<p>Выходные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> – $K_{ш0}$ – коэффициент шума ППМ; – K_{y0} – коэффициент усиления ППМ; – $P_{лин0}$ – верхняя граница линейности ППМ по входу; – $P_{ш}$ – мощность шумов на выходе ППМ.

Зависимость между искомыми данными и исходными величинами описывается следующими формулами:

$$K_{y0} = \sum_{i=1}^n K_{yi}, (ед.), \quad (1)$$

$$K_{ш0} = L_{вх} + K_{ш1} + \frac{K_{ш2} - 1}{K_{y1}} + \frac{K_{ш3} - 1}{K_{y1} \cdot K_{y1}} + \dots + \frac{K_{шn} - 1}{\prod_{i=1}^{n-1} K_{yi}} (ед.). \quad (2)$$

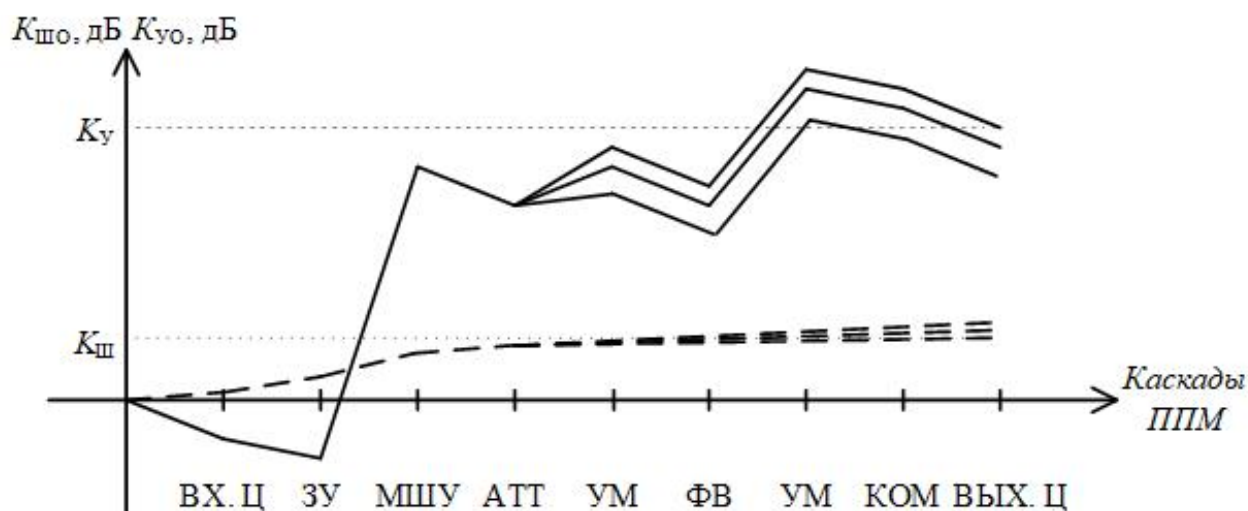
Представим данную часть математической модели ППМ в графической форме – в виде диаграммы уровней (рисунок 2, масштаб показан условно).

Для управления формой диаграммы направленности АФАР величина затухания, вносимого аттенуатором, изменяется, поэтому представленная математическая модель является динамической. Начиная с точки «АТТ» распределение $K_{ш0}$ и K_{y0} по каскадам ППМ становится семейством характеристик. Значение данной особенности работы ППМ в составе приёмной части АФАР при определении параметров сквозного приёмного тракта будет рассмотрено ниже.

Верхнюю границу линейности по входу ППМ определим следующим образом:

$$P_{лин0} = P_{линon} - K_{y0}, (дБ/Вт), \quad (3)$$

где n – номер каскада, ранее других достигающего границы линейности.

Рисунок 2 – Диаграмма уровней K_y и $K_{ш}$ Figure 2 – K_y and $K_{ш}$ level diagram

Для расчёта ширины динамического диапазона (D) предварительно рассчитаем мощность шумов, приведённых ко входу ППМ:

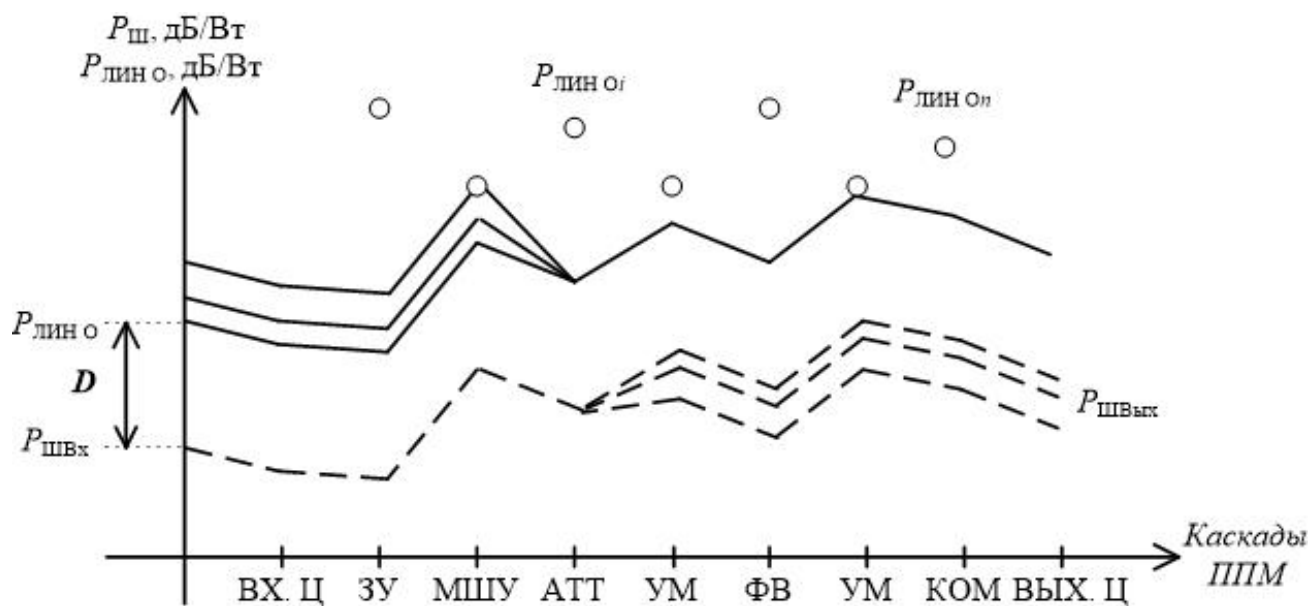
$$P_{ш} = 10 \cdot \lg(k \cdot T_0 \cdot \Delta F \cdot K_{ш}), \text{ (дБ/Вт)}. \quad (4)$$

Определим динамический диапазон как:

$$D = |P_{ш} - P_{лин0}|, \text{ (дБ)}. \quad (5)$$

Поскольку при изменении амплитудного распределения по раскрытию АФАР коэффициент усиления ППМ также изменяется, то значения $P_{лин0}$, $P_{ш}$ и D варьируются. Представление математической модели для $P_{лин0}$, $P_{ш}$ и D , в графической форме – в виде диаграммы уровней – показаны на рисунке 3 (масштаб показан условно).

Математическая модель $P_{ш}$ и D , как и модель K_y и $K_{ш}$ так же является динамической. При этом в отличие от $P_{ш}$, $P_{лин0}$ является семейством характеристик до точки «АТТ».

Рисунок 3 – Диаграмма уровней $P_{ш}$, $P_{лин0}$ и D Figure 3 – $P_{ш}$, $P_{лин0}$, and D level diagram

Математическая модель приёмной части АФАР

Далее разработаем математическую модель приёмной части АФАР, как параллельное включение N приёмопередающих модулей, объединённых сумматором мощности. Дальнейшие расчёты будем вести на основании теоретического предположения, что все каналы АФАР абсолютно идентичны и имеют одинаковые электродинамические характеристики, а принимаемые сигналы когерентны и синфазны.

Рассмотрим сложение двух гармонических сигналов в сумматоре мощности (рисунок 4).

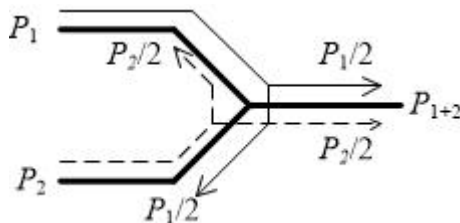


Рисунок 4 – Сложение гармонических сигналов в сумматоре мощности

Figure 4 – Addition of harmonic signals in power summator

$$P_{1+2} = \frac{P_1}{2} + \frac{P_2}{2} + 2 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{P_2}{2}} \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (6)$$

где P_{1+2} – суммарная мощность двух сигналов на выходе сумматора; P_1 , P_2 , φ_1 , и φ_2 – мощности и фазы двух суммируемых сигналов.

Если сигналы когерентны и разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$, а мощность $P_1 = P_2$, то соотношение (6) упрощается:

$$P_{1+2} = 2 \cdot P_1 \text{ или } P_{1+2+\dots+n} = N \cdot P_1. \quad (7)$$

При сложении шумовых сигналов, которые по своей сути не когерентны и являются случайными процессами, разность фаз $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ также будет случайной величиной. Исходя из этого, множитель $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ стремится к 0, поскольку математическое ожидание от функции $\cos(\varphi)$ равно 0:

$$M(\cos(\varphi)) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(\varphi) d\varphi = 0, \quad (8)$$

где M – оператор математического ожидания.

В таком случае, если мощности складываемых случайных сигналов равны ($P_1 = P_2$), то соотношение (6) принимает вид:

$$P_{1+2} = P_1 \text{ или } P_{1+2+\dots+n} = P_1. \quad (9)$$

Другими словами, спектральная плотность мощности шумов на выходе АФАР в этом случае будет такой же, как и на выходе одного канала за счёт того, что шум в каналах не коррелирован.

В случае, когда сигналы и шумы всех каналов суммируются с равными амплитудами, получается наибольший выигрыш в отношении сигнал/шум. На практике к приёмным АФАР наряду с требованиями к энергетическим характеристикам предъявляются требования к форме диаграммы направленности, например к уровню боковых лепестков. Для удовлетворения указанных требований сигналы от каждого канала АФАР должны суммироваться с различными весовыми коэффициентами $L_{\text{АТТ},i}$ – вносимое затухание управляемого аттенюатора в i -м ППМ. Внесение этого затухания необходимо для формирования требуемого амплитудного распределения по раскрытию антенной решётки и управлению формой диаграммы направленности. При этом энергетические и шумовые параметры приёмной части АФАР будут ухудшаться.

Для разработки математической модели массива ППМ, включенных параллельно (интегральной приёмной части АФАР), будем использовать входные и выходные данные, приведённые в таблице 2.

Таблица 2 – Входные и выходные данные математической модели массива ППМ

Table 2 – Input and output data of TRM array mathematical model

<p>Входные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> – $K_{\text{ШО}}$ – коэффициент шума ППМ; – $K_{\text{УО}}$ – коэффициент усиления ППМ; – $L_{\text{ВХ}}$ – потери во входных цепях; – $L_{\text{ВЫХ}}$ – потери в выходных цепях, включая сумматор; – $L_{\text{АТТ.}i}$ – вносимое затухание аттенюатора i-го ППМ; – $P_{\text{ЛИН0}}$ – верхняя граница линейности ППМ по входу; – ΔF – сквозная полоса.
<p>Выходные данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> – $K_{\text{ША}}$ – коэффициент шума АФАР; – $K_{\text{УА}}$ – коэффициент усиления приёмной части АФАР; – $P_{\text{ЛИНА}}$ – верхняя граница линейности АФАР по выходу; – $P_{\text{ША}}$ – мощность шумов на выходе АФАР.

Модель имеет подробную структуру и предполагает настройку каждого отдельного канала АФАР, которые, в свою очередь, смоделированы в соответствии со структурными схемами приёмных каналов ППМ. После ввода входных данных алгоритм расчёта характеристик приёмной части АФАР согласно разработанной выше модели выглядит следующим образом.

1. Рассчитаем средневзвешенное затухание аттенюаторов по раскрытию АФАР для формируемого амплитудного распределения:

$$L_{\text{АТТ.СР.}} = \frac{N}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{L_{\text{АТТ}i}}}, (\text{ед.}). \quad (10)$$

2. Рассчитаем усиления АФАР $K_{\text{УА}}$:

$$K_{\text{УА}} = K_{\text{УО}} - L_{\text{АТТ.СР.}} - L_{\text{ВХ}} - L_{\text{ВЫХ}}, (\text{дБ}). \quad (11)$$

3. Рассчитаем коэффициент шума АФАР $K_{\text{ША}}$ [10]:

$$K_{\text{ША}} = L_{\text{ВХ}} \cdot K_{\text{ШО}} - \frac{L_{\text{ВХ}}}{K_{\text{УО}}} + L_{\text{АТТ.СР.}} \cdot \frac{L_{\text{ВХ}}}{K_{\text{УО}}} \cdot L_{\text{ВЫХ}}, (\text{ед.}). \quad (12)$$

4. Рассчитаем мощность собственных шумов на выходе АФАР:

$$P_{\text{ША}} = 10 \cdot \lg(k \cdot T_0 \cdot \Delta F \cdot K_{\text{ША}} \cdot K_{\text{УА}} \cdot L_{\text{ВХ}} \cdot L_{\text{ВЫХ}}), (\text{дБ} / \text{Вт}). \quad (13)$$

5. При этом верхнюю границу линейности по выходу АФАР определим следующим образом:

$$P_{\text{ЛИНА}} = P_{\text{ЛИН0}} + K_{\text{УА}} + 10 \lg(N), (\text{дБ} / \text{Вт}).$$

Структурная схема математической модели для проведения такого рода расчётов представлена на рисунке 5.

Разработанная математическая модель использовалась для предварительных расчётов параметров приёмной части АФАР при исследовании возможности применения сложных видов амплитудных распределений, таких как воронкообразные и многолучевые. Также модель использовалась при исследовании работы АФАР в режиме приёма по отдельным независимым четвертям, каждая по $N/4$ канала. Экспериментальные исследования показали высокую

степень близости расчётных и измеренных параметров. Пример расчёта параметров АФАР для спадающего амплитудного распределения с низким уровнем боковых лепестков показан в таблице 3.

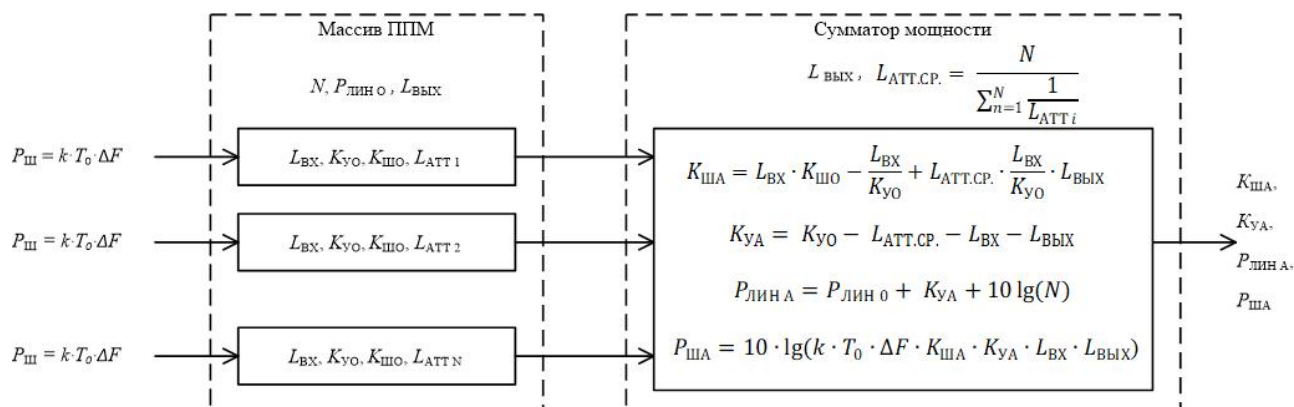


Рисунок 5 – Структурная схема математической модели АФАР

Figure 5 – Structure diagram of ARAA mathematical model

Таблица 3 – Результаты моделирования параметров АФАР

Table 3 – Results of ARAA parameter modeling

Параметр АФАР	Результаты моделирования	Измерения АФАР
$K_{\text{уА}}, \text{дБ}$	K	$K - 0,4$
$K_{\text{шА}}, \text{дБ}$	N	$N + 0,5$
$P_{\text{шА}}, \text{дБ/Вт}$	P	$P + 2,7$
$P_{\text{линА}}, \text{дБ/Вт}$	C	$C + 4$

Заключение

Для оценки эффективности предложенной модели введём следующий критерий: коэффициент шума сквозного приёмного канала не должен превышать коэффициента шума МШУ более чем на 0,5 дБ. Такое увеличение коэффициента шума снижает дальность действия РЛС не более чем на 3 %. Рассмотрим следующий пример. Зададимся условными параметрами ППМ: $K_{\text{ш1}} = 4,0$ дБ, $K_{\text{у1}} = 23$ дБ (с учётом потерь на входе $L_{\text{вх}}$). Коэффициент шума следующего каскада – приёмника СВЧ – $K_{\text{ш2}} = 14,0$ дБ. Потери в линии связи между каскадами $L = 3$ дБ. Для вычисления коэффициента шума сквозного приёмного канала $K_{\text{ш0}}$ применим формулу (2) без учёта амплитудного распределения АФАР. В результате вычислений получим, что $K_{\text{ш0}} = 4,4$ дБ. Проведём вычисления с учётом спадающего амплитудного распределения при $L_{\text{атт ср}} = 6$ дБ. В этом случае с учётом формул (11) и (12) $K_{\text{у1}}$ и $K_{\text{ш1}}$ примут значения 16 дБ и 4,1 дБ соответственно (при $L_{\text{вых}} = 1$ дБ). Применяв формулу (2) для указанных значений, получим $K_{\text{ш0}} = 5,8$ дБ. То есть избыточный прирост коэффициента шума составит 1,4 дБ, что дополнительно снижает дальность действия РЛС на 7,5 %. Для того, что сквозной приёмный канал соответствовал указанному выше критерию, необходимо уменьшать коэффициент шума приёмника СВЧ. В данном примере $K_{\text{ш2}}$ не должен превышать 7,6 дБ. Данный пример показывает, каким образом представленная математическая модель позволяет оптимизировать параметры сквозного приёмного тракта в РЛС с АФАР по критерию увеличения коэффициента шума на заданную величину.

Исследование разработанной математической модели приёмной части АФАР показало следующее.

1. Такие параметры приёмной части АФАР, как коэффициент шума, коэффициент усиления и спектральная плотность мощности шумов на выходе АФАР, зависят от формы диаграммы направленности. Эта зависимость обусловлена тем, что формирование сложных

форм луча АФАР или спадающих распределений с низким уровнем боковых лепестков происходит путем введения дополнительного затухания в приёмную часть ППМ. Это приводит к изменению параметров ППМ, а именно к увеличению коэффициента шума и уменьшению коэффициента усиления АФАР. Поскольку АФАР в радиолокационной станции представляет собой малозумящий усилитель, то изменение указанных параметров существенно отразится на характеристиках сквозного приёмного канала в целом. Поэтому при расчёте шумовых характеристик АФАР и приёмного канала нельзя опираться только на параметры ППМ. Необходимо учитывать средневзвешенное значение затухания аттенюатора по раскрытию АФАР. Игнорирование данной характеристики при расчётах приведёт к снижению потенциала РЛС и, как следствие, к уменьшению дальности её действия. Средневзвешенное значение аттенюатора, в свою очередь, определяются требуемой формой диаграммы направленности АФАР.

2. Поскольку сигнал, отражённый от цели, принимается всеми приемными каналами АФАР, усиливается и затем синфазно суммируется на выходе АФАР, то его уровень прямо пропорционален количеству каналов АФАР. Это приводит к тому, что верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу АФАР превышает верхнюю границу динамического диапазона ППМ. Если количество приёмных каналов АФАР значительно, то мощность выходного сигнала в линейном режиме может достигать сотен милливатт, а в отдельных случаях и единиц ватт. Поэтому при проектировании последующих каскадов приёмного канала необходимо учитывать данную особенность АФАР, так как максимально допустимый уровень мощности на входе смесителей СВЧ сигналов не превышает 100 мВт. Игнорирование данной особенности АФАР может привести не только к уменьшению полного динамического диапазона сквозного приёмного канала, но и к выходу из строя следующих за АФАР устройств.

Библиографический список

1. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем. Теория и методы расчета. – М.: Сов. Радио. 1974. 234 с.
2. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн: фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием // Сов. Радио. 1980. 296 с.: ил.
3. Волошин В.А., Габриэльян Д.Д., Оводов О.В. Синтез амплитудно-фазового распределения в антенных решетках с произвольным контуром // Антенны. 2010. № 2(153). С. 44-47.
4. Хлусов В.А., Доценко В.В. Коэффициент шума активной антенной решетки // Доклады ТУСУРа. Т. 20. № 4. 2017. С. 7-10.
5. Хлусов В.А., Доценко В.В. Сравнительный анализ коэффициента шума пассивных и активных антенных решёток // Радиотехника. 2018. № 2. С. 61-67.
6. Плешивцев В.И. СВЧ-приёмники радиолокационных систем. Монография. М.: Радиотехника. 2012. 184 с.: ил.
7. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В. Перспективный многофункциональный приемопередающий модуль АФАР X-диапазона и методика измерения его параметров // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2017. С. 355-360.
8. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Жерновенков В.А., Синькова Е.А., Щеголев С.А. Многофункциональный приемопередающий модуль АФАР нового поколения // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2018. С. 239-242.
9. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Щеголев С.А., Адиятулин А. В. Многофункциональный приемопередающий модуль X-диапазона частот // Научно-технический сборник «Электронная техника». Серия 1 «СВЧ техника». 2019. № 3 (542). С. 51-54.
10. Гостюхин В.Л., Трусков В.Н., Гостюхин А.В. Активные фазированные антенные решётки / под ред. В. Л. Гостюхина. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника. 2011. 304 с.: ил.

UDC 621.396.96

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF APAA RECEIVING PART MATHEMATICAL MODEL

V. I. Protasov, Head of the Department, V. V. Tikhomirov Research Institute of Instrument Engineering, Zhukovsky, Russia;
orcid.org/0009-0001-4223-5049, e-mail: protasov.v@nio9.niip.ru

The paper considers the task of developing and researching a mathematical model of the receiving part of active phased array. The aim of the work is to create a mathematical model for calculating noise and dynamic parameters of active phased array, which are necessary for the design of a through-channel receiver for radio systems. The task of this work is to identify the dependence of noise and dynamic characteristics of active phased array on the shape of amplitude distribution across antenna array. The paper explores the problem of calculating noise factor and gain factor during design phase of active phased array. A mathematical model has been developed that can be used both for preliminary calculation of entire receiving channel sensitivity and for comparing the calculated values with the data obtained during experimental studies.

Keywords: APAA, PAA, radar, noise factor, noise, amplitude distribution, mathematical model, dynamic range, signal-to-noise ratio, sensitivity.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-13-20

References

1. **Bahrah L.D., Kremeneckij S.D.** *Sintez izluchajushhih sistem. Teorija i metody raschjota*. Moscow: Sov. Radio. 1974. (in Russian).
2. **Zelkin E.G., Sokolov V.G.** *Metody sintez a antenn: fazirovannye antennye reshjotki i anteny s nepreryvnym raskryvom*. Moscow: Sov. Radio. 1980. (in Russian).
3. **Voloshin V.A., Gabrijel'jan D.D., Ovodov O.V.** Sintez amplitudnofazovogo raspredelnija v antennyh reshjotkah s kproizvol'nym konturom. *Antenny*. 2010, no. 2(153), pp. 44-47. (in Russian).
4. **Hlusov V.A., Docenko V.V.** Koeficient shuma aktivnoj antennoj reshjotki. *Doklady TUSURa*. 2017, vol. 20, no. 4, pp. 7-10. (in Russian).
5. **Hlusov V.A., Docenko V.V.** Sravnitel'nyj analiz koeficienta shuma passivnyh i aktivnyh antennyh reshjotok. *Radiotekhnika*. 2018. no. 2, pp. 61-67. (in Russian).
6. **Pleshivcev V.I.** SVCh-prijomniki radiolokacionnyh sistem. Monografija. Moscow: Radiotekhnika. 2012, 184 p. (in Russian).
7. **Karasev M.S., Dalinger A.G., Shackij S.V.** Perspektivnyj mnogofunkcional'nyj prijomopredajushhij modul' AFAR X-diapazona i metodika izmerenija ego parametrov. *Materialy konferencii «Jelektronika i mikroelektronika SVCh»*. 2017, pp.355-360. (in Russian).
8. **Karasev M.S., Dalinger A.G., Shackij S.V., Zhernovenkov V.A., Sin'kova E.A., Shhegolev S.A.** Mnogofunkcional'nyj prijomopredajushhij modul' AFAR novogo pokolenija. *Materialy konferencii «Jelektronika i mikroelektronika SVCh»*. 2018, pp. 239-242. (in Russian).
9. **Karasev M.S., Dalinger A.G., Shackij S.V., Shhegolev S.A., Adiatulin A.V.** Mnogofunkcional'nyj prijomopredajushhij modul' X-diapazona chastot. *Nauchno-tehnicheskij sbornik «Jelektronnaja tehnika» Serija 1 «SVCh tehnika»*. 2019, no. 3(542), pp. 51-54. (in Russian).
10. **Gostjuhin V.L., Trusov V.N., Gostjuhin A.V.** Aktivnye fazirovannye antennye reshjotki / Pod red. Gostjuhina V.L. Izd. 3-e, pererab. i dop. Moscow: Radiotekhnika. 2011, 304 p. (in Russian).