

Математическая модель антенно-волноводного тракта с разделением сигналов по поляризации – частоте

С.И. Бойчук

ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи»
344038, Россия, г. Ростов-на-Дону,
ул. Нансена, 130

Аннотация – Обоснование. Необходимость создания антенно-волноводных трактов многодиапазонных зеркальных антенн систем спутниковой связи требует использования различных методик выбора структуры, определения и оптимизации параметров антенно-волноводных трактов. **Цель.** Разработка математической модели антенно-волноводных трактов многодиапазонных зеркальных антенн, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте» с реализацией функции автосопровождения. **Методы.** Математическую модель антенно-волноводных трактов многодиапазонных зеркальных антенн, построенного на основе способа «разделение по поляризации-разделение по частоте», позволяет определить основные характеристики антенно-волноводных трактов и входящих устройств с функцией автосопровождения. **Результаты.** Определены основные элементы математической модели многодиапазонного антенно-волноводного тракта, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте». **Заключение.** Предложена математическая модель, которая позволяет снизить требования к используемым вычислительным средствам при разработке антенно-волноводных трактов по объему оперативной памяти и быстродействию. Реализована возможность анализа и определения характеристик антенно-волноводных трактов при помощи математической модели. Приведены этапы определения параметров антенно-волноводных трактов на основе разработанной математической модели соответствующего варианта построения, а также теоретические и экспериментальные данные, подтверждающие корректность модели антенно-волноводных трактов.

Ключевые слова – антенно-волноводный тракт; многодиапазонная зеркальная антенна; математическая модель; способ разделения «разделение по частоте – разделение по поляризации»; частотные зависимости характеристик антенно-волноводного тракта.

Введение

Антенно-волноводные тракты (АВТ) являются неотъемлемой составляющей МЗА, обеспечивающей возможность приема/передачи сигналов различных поляризаций в нескольких диапазонах частот [1–12]. Основными задачами, реализуемыми с использованием АВТ, являются разделение принимаемых информационных сигналов по поляризации и частоте, а также формирование сигналов для автосопровождения источника радиозлучения. Параметры АВТ (коэффициент стоячей волны по напряжению на входе и выходе, потери, поляризационные развязки в рабочих диапазонах частот) определяют шумовую добротность МЗА и, соответственно, вероятно-временные характеристики системы связи и передачи данных, точность автосопровождения.

В работах [1–12] рассмотрены вопросы построения АВТ МЗА на основе способа «разделение по частоте – разделение по поляризации», обеспечивающих совмещение до четырех диапазонов частот. Однако такие АВТ являются сложными и громоздкими устройствами. В ряде случаев более предпочтительным является построение АВТ

МЗА на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте», позволяющих совмещать меньшее число частотных диапазонов, но являющихся более простыми по структуре и имеющих существенно меньшие массогабаритные параметры.

Непосредственный расчет такого АВТ и оптимизация его параметров с использованием пакетов для электродинамического моделирования требуют значительных временных затрат на подготовку собственно проекта для проведения моделирования, а также большого объема вычислений, что, как следствие, даже с использованием современных компьютеров приводит к значительным временным затратам. Разработку и анализ характеристик АВТ, в том числе и рассматриваемых АВТ, можно упростить при использовании известных характеристик отдельных устройств, входящих в состав АВТ [1–12]. При расчете характеристик каждого из устройств, входящих в состав АВТ, совокупное время расчета будет 3–4 раза меньше, чем при расчете всей сборки АВТ. Однако характеристики АВТ в целом при таком подходе могут быть получены только при совместной об-

работке характеристик каждого из устройств. Последнее может быть реализовано только с использованием математической модели, описывающей АВТ как соединение многополюсников, характеристики которых могут быть для каждого из устройств, входящих в состав АВТ, определены теоретически или экспериментально.

Целью статьи является построение математической модели АВТ МЗА, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте» с реализацией функции автосопровождения.

Решаемые задачи:

1. Основные элементы математической модели АВТ, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте».
2. Теоретико-экспериментальное подтверждение корректности модели АВТ.

1. Основные математические элементы математической модели АВТ, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте»

Наиболее полным в функциональном отношении вариантом построения антенны является антенная система, обеспечивающая прием/передачу сигналов и автосопровождение радиоизлучающего объекта по направлению. В варианте построения такой функционально полной МЗА наиболее высокие радиотехнические характеристики достигаются при использовании облучающей системы с единым раскрывом в виде рупора [13; 14].

Принципиальной особенностью построения АВТ в этом случае является использование двух каналов – канала основной моды принимаемых сигналов и канала высшей моды принимаемых сигналов. Структурная схема АВТ, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте» для приема сигналов четырех поляризаций (линейные вертикальная и горизонтальная, круговые левая или правая) в J диапазонах частот, приведена на рис. 1 [15].

Достоинством данного варианта построения АВТ является отсутствие диплексеров, выполненных на основе волноводного моста, частотного разветвителя и сумматора, для разделения сигналов совмещаемых диапазонов частот, недостатком – ограничения по рабочей полосе частот устройства поляризационного преобразования и

селекции, определяющие возможность совмещения диапазонов частот.

В общем случае при разработке математической модели АВТ необходимо рассматривать на выходе облучающей системы МЗА суперпозицию сигналов, каждый из которых лежит в одном из J возможных для приема диапазонов частот и имеет одну из четырех возможных поляризаций.

С учетом рассматриваемой структурной схемы и представления полей в АВТ суперпозицией основной и высших мод в диапазоне частот основными элементами математической модели АВТ будут являться матрицы, описывающие характеристики устройств АВТ в полномолновом представлении в рабочей полосе частот.

Суперпозиция сигналов с выхода облучателя поступает на вход устройства, в котором для каждого из принимаемых сигналов происходит выделение основной моды (суммарный канал) и высшей моды (разностный канал). Основная мода каждого из принимаемых сигналов имеет структуру H_{11} , ориентация силовых линий которой определяется поляризацией принимаемого сигнала (рис. 2, а и б), высшая мода – структуру H_{21} , ориентация силовых линий которой также определяется поляризацией принимаемого сигнала (рис. 2, в и г).

На выходе облучателя и в самом АВТ могут также возбуждаться паразитные типы мод более высоких порядков. С учетом этого каждый сигнал при моделировании определяется N гармониками частотного спектра и Q модами типов волн.

Различие структуры мод H_{11} и H_{21} обуславливает несимметричное построение суммарного и разностного каналов АВТ. Разделение по поляризациям основной моды с учетом структуры волны H_{11} осуществляется с использованием фазосдвигающей 90-градусной секции и ортомодового преобразователя [1]. Для ответвления моды H_{21} с учетом структуры поля используется восемь наборов щелей, обеспечивающих отбор высшей моды ортогональных составляющих принимаемых сигналов. На основе этих составляющих с использованием двойных Т-мостов возможно выделение составляющих высшей моды, соответствующих сигналам каждой из четырех поляризаций. Разделение по поляризации принимаемых сигналов осуществляется с использованием переключателя.

Сигналы суммарного и разностного каналов поступают в устройство преобразования и формирования сигнала ошибки, в котором формируются сигналы управления МЗА при автосопровождении радиоизлучающего объекта. Кроме того,

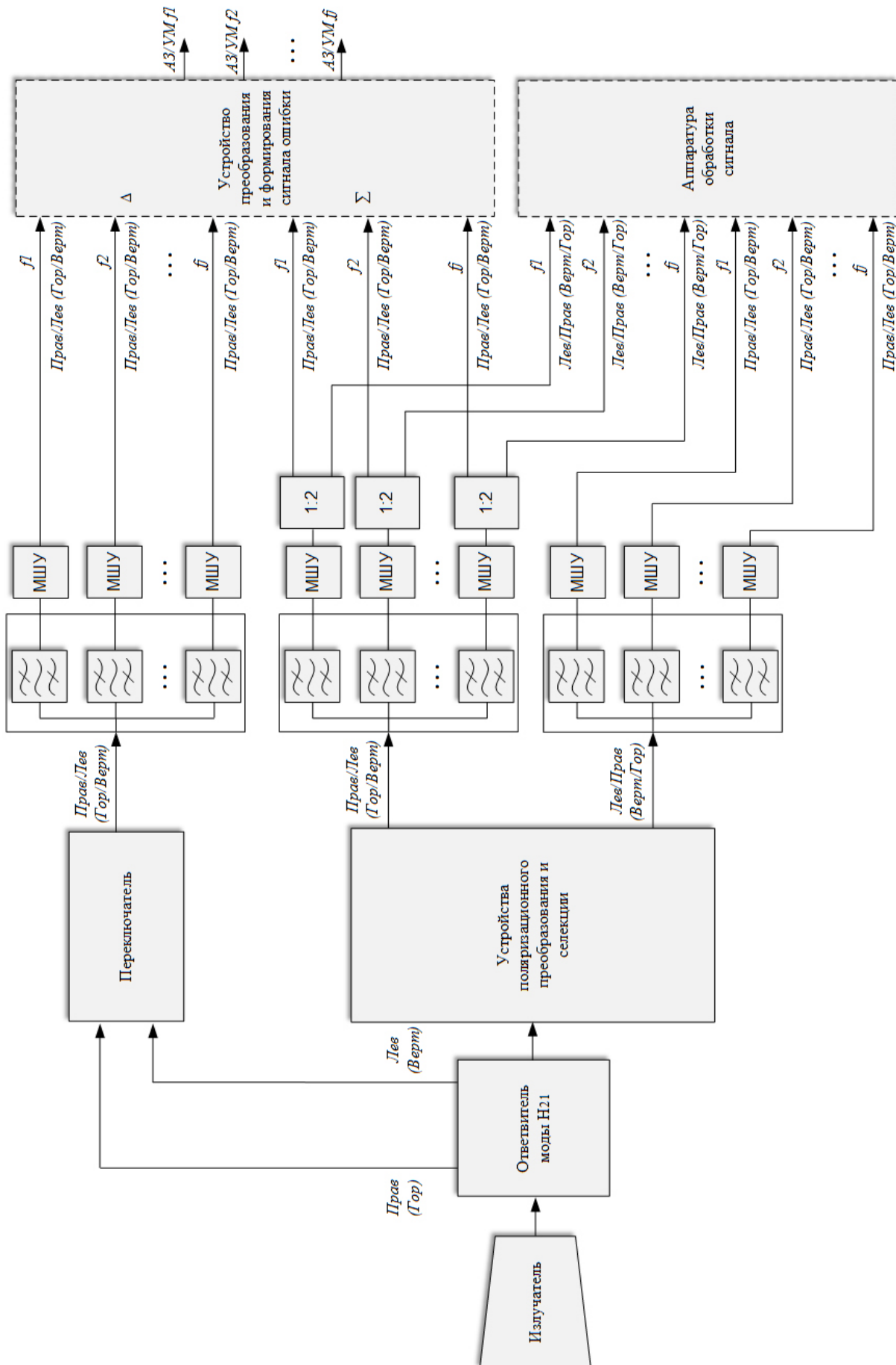


Рис. 1. Структурная схема АВТ МЗА на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте» с режимом автопротождения
 Fig. 1. Block diagram of AVT MZA based on the method of polarization separation – frequency separation with auto-tracking mode

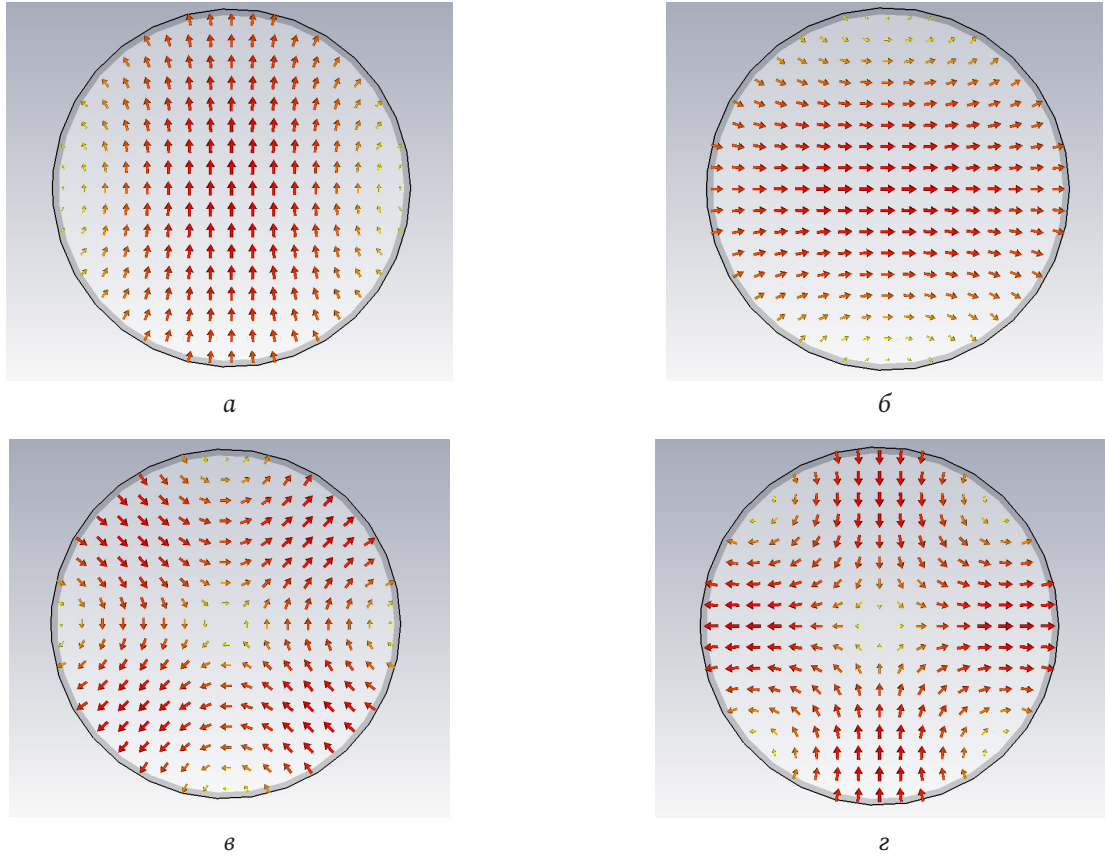


Рис. 2. Структура поля круглом волноводе при различных поляризациях: а, б – мода H_{11} (вертикальная/горизонтальная); в, г – мода H_{21} (вертикальная/горизонтальная)
Fig. 2. Field structure in a circular waveguide at different polarizations: а, б – H_{11} mode (vertical/horizontal); в, г – H_{21} mode (vertical/horizontal)

сигналы суммарного канала поступают на вход устройства обработки для демодуляции принимаемых сигналов.

Для рассматриваемой структуры АВТ сигналы суммарного (Σ) и разностного (Δ) каналов могут быть представлены следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{\Sigma} &= \mathbf{H}_{\Sigma} \cdot \mathbf{G}_{\Sigma} \cdot \mathbf{C}_{\Sigma} \cdot \mathbf{U}, \\ \mathbf{V}_{\Delta} &= \mathbf{H}_{\Delta} \cdot \mathbf{G}_{\Delta} \cdot \mathbf{C}_{\Delta} \cdot \mathbf{U}. \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{U} – вектор, элементами которого являются сигналы на выходе облучающей системы МЗА; \mathbf{C}_{Σ} и \mathbf{C}_{Δ} – матрицы, описывающие устройства разделения сигналов по поляризации в суммарном и разностном канале; \mathbf{G}_{Σ} и \mathbf{G}_{Δ} – матрицы, описывающие устройства частотного разделения сигналов, соответственно, в суммарном и разностном канале.

В соотношении (1) \mathbf{U} как математический объект имеет блочную структуру вида, соответствующую четырем возможным поляризациям принимаемых сигналов

$$(\mathbf{U})^T = (\mathbf{U}^{(1)} \quad \mathbf{U}^{(2)} \quad \dots \quad \mathbf{U}^{(4)}), \quad (2)$$

элементы которой $\mathbf{U}^{(p)}$ ($p=1, \dots, 4$) также имеют блочную структуру размерности $J \times 1$:

$$(\mathbf{U}^{(p)})^T = (\mathbf{U}^{(p,1)} \quad \mathbf{U}^{(p,2)} \quad \dots \quad \mathbf{U}^{(p,J)}). \quad (3)$$

Элементы блока $\mathbf{U}^{(p,t)}$ ($t=1, \dots, J$), в свою очередь, описывают N гармоник в спектре принимаемого сигнала в t -м диапазоне частоты и имеют вид

$$(\mathbf{U}^{(p,t)})^T = (\mathbf{U}^{(p,t,1)} \quad \mathbf{U}^{(p,t,2)} \quad \dots \quad \mathbf{U}^{(p,t,N)}).$$

Элементами матрицы $\mathbf{U}^{(p,t,r)}$ ($r=1, \dots, N$) являются комплексные амплитуды Q мод каждой гармоники, учитываемые при моделировании в АВТ

$$\mathbf{U}^{(p,t,r)} = (\dots \quad u_{p,t,r,f} \quad \dots),$$

соответствующие r -й частотной гармонике f -й моды сигнала p -й поляризации в t -м диапазоне частоты принимаемого сигнала.

В соответствии с принятым описанием сигналов в АВТ структура матрицы \mathbf{C}_{Σ} определяется следующим выражением:

$$\mathbf{C}_\Sigma = \begin{pmatrix} \left(\mathbf{C}_{\Sigma(1)}^{(1)} & \mathbf{C}_{\Sigma(2)}^{(1)} & \dots & \mathbf{C}_{\Sigma(4)}^{(1)} \right) \\ \left(\mathbf{C}_{\Sigma(1)}^{(2)} & \mathbf{C}_{\Sigma(2)}^{(2)} & \dots & \mathbf{C}_{\Sigma(4)}^{(2)} \right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left(\mathbf{C}_{\Sigma(1)}^{(4)} & \mathbf{C}_{\Sigma(2)}^{(4)} & \dots & \mathbf{C}_{\Sigma(4)}^{(4)} \right) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

а каждый блок $\mathbf{C}_{\Sigma(p)}^{(m)}$ ($m = 1, \dots, 4$; $p = 1, \dots, 4$) имеет вид

$$\mathbf{C}_{\Sigma(p)}^{(m)} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\Sigma(p,1)}^{(m,1)} & \mathbf{C}_{\Sigma(p,2)}^{(m,1)} & \dots & \mathbf{C}_{\Sigma(p,J)}^{(m,1)} \\ \mathbf{C}_{\Sigma(p,1)}^{(m,2)} & \mathbf{C}_{\Sigma(p,2)}^{(m,2)} & \dots & \mathbf{C}_{\Sigma(p,J)}^{(m,2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{C}_{\Sigma(p,1)}^{(m,J)} & \mathbf{C}_{\Sigma(p,2)}^{(m,J)} & \dots & \mathbf{C}_{\Sigma(p,J)}^{(m,J)} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Каждый из блоков матрицы $\mathbf{C}_{\Sigma(p,t)}^{(m,j)}$ имеет вид

$$\mathbf{C}_{\Sigma(r,t)}^{(j,m)} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\Sigma(p,t,1)}^{(m,j,1)} & \mathbf{C}_{\Sigma(p,t,2)}^{(m,j,1)} & \dots & \mathbf{C}_{\Sigma(p,t,N)}^{(m,j,1)} \\ \mathbf{C}_{\Sigma(p,t,1)}^{(m,j,2)} & \mathbf{C}_{\Sigma(p,t,2)}^{(m,j,2)} & \dots & \mathbf{C}_{\Sigma(p,t,N)}^{(m,j,2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{C}_{\Sigma(p,t,1)}^{(m,j,N)} & \mathbf{C}_{\Sigma(p,t,2)}^{(m,j,N)} & \dots & \mathbf{C}_{\Sigma(p,t,N)}^{(m,j,N)} \end{pmatrix}.$$

Элемент $c_{\Sigma p,t,r,f}^{m,j,n,q}$ блока матрицы $\mathbf{C}_{\Sigma(p,t,r)}^{(m,j,n)}$ позволяет представить вклад f -й моды r -й гармоники сигнала p -й поляризации t -го диапазона частот, поступающего с выхода облучателя на входе ответвителя моды H_{21} , в p -ю моду n -й гармоники сигнала m -й поляризации j -го диапазона частот на выходе АВТ МЗА ($j, t = 1, \dots, J$; $m, p = 1, \dots, 4$; $n, r = 1, \dots, N$; $q, f = 1, \dots, Q$).

Элемент $c_{\Sigma p,t,r,f}^{m,j,n,q}$ определяет:

- при $m = p$, $j = t$, $n = r$ и $q = f$ коэффициент передачи q -й моды n -й гармоники сигнала j -го диапазона частот m -й поляризации со входа ответвителя моды H_{21} на его выход;
- при $m \neq p$, $j \neq t$, $n \neq r$ и $q \neq f$ коэффициент трансформации f -й моды r -й гармоники сигнала t -го диапазона частот p -й поляризации на входе ответвителя моды H_{21} в q -ю моду n -й гармоники сигнала j -го диапазона частот m -й поляризации на его выходе;
- при совпадении трех любых пар индексов и несовпадении одной пары индексов данный элемент определяет соответствующий вид развязки (поляризационную, частотную, гармоник или модовую) в устройстве отбора моды H_{21} .

Матрица \mathbf{G}_Σ имеет аналогичную структуру, как и матрица \mathbf{C}_Σ , а ее элементы определяют коэффициенты передачи, трансформации и развязки

для устройства поляризационного преобразования и селекции.

Матрица \mathbf{H}_Σ , описывающая математическое представление системы фильтров, с достаточной для практического применения точностью может быть представлена следующей структурой:

$$\mathbf{H}_\Sigma = \left(\mathbf{H}_\Sigma^{(1)} \quad \mathbf{H}_\Sigma^{(2)} \quad \dots \quad \mathbf{H}_\Sigma^{(4)} \right), \quad (6)$$

в которой каждый из блоков $\mathbf{H}_\Sigma^{(m)}$ ($m = 1, \dots, 4$) имеет вид

$$\left(\mathbf{H}_\Sigma^{(m)} \right) = \left(\mathbf{0} \quad \dots \quad \mathbf{h}_\Sigma^{(m,j)} \quad \mathbf{0} \quad \dots \right). \quad (7)$$

Элементы $\mathbf{h}_\Sigma^{(m,j)}$ определяют прохождение сигнала m -й поляризации j -го диапазона частоты на выход соответствующего фильтра.

Для каждого блока $\mathbf{h}_\Sigma^{(m,j)}$, являющегося как математический объект вектором-строкой, можно записать

$$\mathbf{h}_\Sigma^{(m,j)} = \left(\mathbf{h}_{\Sigma}^{(m,j,1)} \quad \mathbf{h}_{\Sigma}^{(m,j,2)} \quad \dots \quad \mathbf{h}_{\Sigma}^{(m,j,N)} \right), \quad (8)$$

$$\mathbf{h}_{\Sigma}^{(m,j,n)} = \left(\mathbf{h}_{\Sigma}^{(m,j,n,1)} \quad \mathbf{h}_{\Sigma}^{(m,j,n,2)} \quad \dots \quad \mathbf{h}_{\Sigma}^{(m,j,n,Q)} \right). \quad (9)$$

Структура матриц \mathbf{C}_Δ , \mathbf{G}_Δ и \mathbf{H}_Δ аналогичны структуре матриц \mathbf{C}_Σ , \mathbf{G}_Σ и \mathbf{H}_Σ , а их элементы имеют тот же физический смысл при описании сигналов в разностном канале, что и элементы матриц \mathbf{C}_Σ , \mathbf{G}_Σ и \mathbf{H}_Σ при представлении сигналов в суммарном канале.

Соотношения, описывающие (1)–(9) математическую модель АВТ, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте», позволяют определить такие характеристики МЗА, как коэффициент полезного действия $\eta_{m,j}$ (КПД), крутизну пеленгационной характеристики $\mu_{m,j}$ (ПХ), поляризационную $\xi_{m,p}$ и частотную развязку $\psi_{j,f}$:

$$\eta_{m,j} = \left| \sum_{n=1}^N \frac{V_\Sigma^{(m,j,n,0)}}{U^{(m,j,n,0)}} \right|^2, \quad (10)$$

$$\mu_{m,j} = \left| \frac{V_\Delta^{(m,j,n_0,1)}}{V_\Sigma^{(m,j,n_0,0)}} \right|, \quad (11)$$

$$\xi_{m,m'}^{(p)} = \left| \sum_{n=1}^N \frac{V_\Sigma^{(m,j,n_0,0)}}{V_\Sigma^{(m',j,n_0,0)}} \right|, \quad (12)$$

$$\psi_{j,j'} = \left| \sum_{n=1}^N \frac{V_\Sigma^{(m,j,n,0)}}{V_\Sigma^{(m,j',n,0)}} \right|. \quad (13)$$

В соотношениях (11), (12) n_0 – индекс, соответствующий частоте, на которой проводится формирование сигналов автосопровождения.

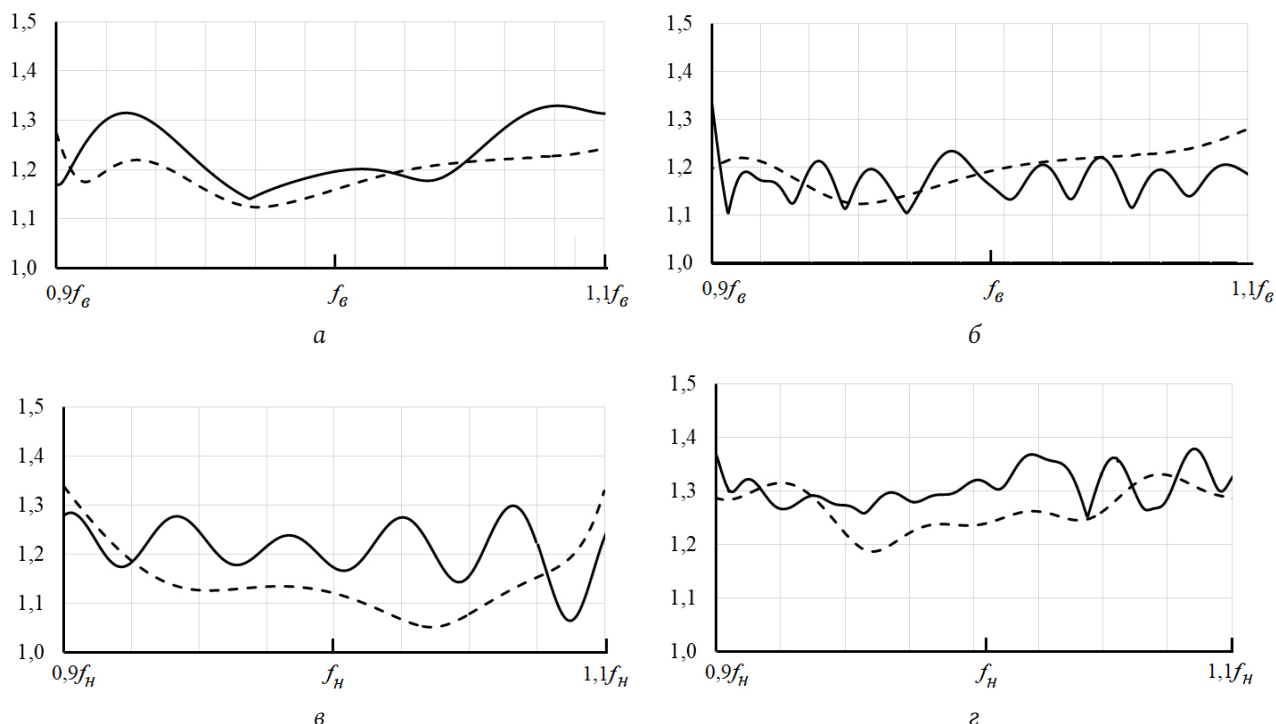


Рис. 3. Частотная зависимость КСВН сигналов с поляризацией: в диапазоне с центральной частотой f_c : а – линейная; б – круговая; в диапазоне с центральной частотой f_n : в – линейная; г – круговая
 Fig. 3. Frequency dependence of VSWR of signals with polarization: in the range with a central frequency f_c : а – linear; б – circular; in the range with a central frequency f_n : с – linear; д – circular

Соотношения (1)–(19) полностью определяют математическую модель АВТ, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте» и с использованием выражений (10)–(13) позволяют оценить характеристики МЗА.

2. Теоретико-экспериментальное подтверждение корректности модели АВТ

Для оценки корректности разработанной математической модели были проведены исследования двухдиапазонного АВТ, обеспечивающего в каждом из двух диапазонов частот прием сигналов любой из четырех поляризаций. Отношение центральных частот диапазонов составляет $f_2/f_1 = 1,65:1$, относительная ширина рабочей полосы частот $\Delta F_2/f_2 = 0,2$ и $\Delta F_1/f_1 = 0,2$. При математическом моделировании АВТ число мод Q и гармоник N при расчете характеристик устройств АВТ определялось из условия сходимости значений мод и гармоник в представлении полей в устройствах АВТ и составляло 1000 и до 10 соответственно. Результаты исследований характеристик АВТ представлены на рис. 3–5 сплошными (экспериментальные данные) и штриховыми (результаты численного моделирования) линиями.

На рис. 3 приведены частотные зависимости КСВН для каждой из двух поляризаций, принимаемых в одном и втором диапазонах частот. При этом с учетом симметрии построения тракта для обеих линейных поляризаций и аналогичной симметрии для обеих круговых поляризаций соответствующие характеристики считаются одинаковыми для каждой пары поляризаций.

На рис. 4 для каждого из диапазонов частот приведены частотные зависимости потерь в каналах АВТ для основной и высшей мод. Набор устройств для селекции сигналов линейных и круговых поляризаций не отличается. Формирование режимов приема сигналов линейной и круговой поляризаций достигается изменением положения фазосдвигающей секции в устройстве поляризационного преобразования и селекции. Разность потерь в устройстве при этом не превышает 0,1 дБ.

На рис. 5 для каждого из диапазонов частот приведены частотные зависимости на выходе АВТ поляризационной развязки сигналов одноименной поляризации (линейных – вертикальной и горизонтальной, круговых – левой и правой).

Сравнение расчетных и измеренных характеристик подтвердило достаточную для практического применения корректность разработанной математической модели АВТ, построенного на основе

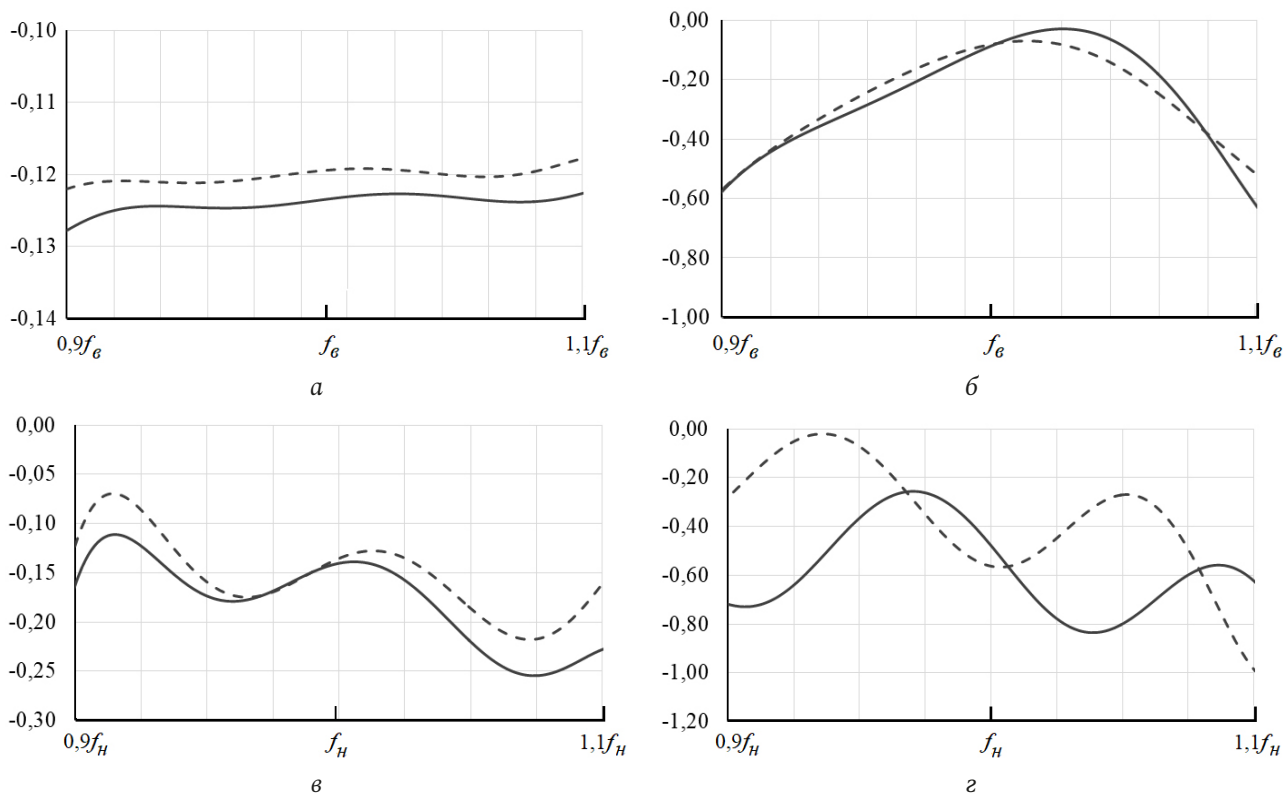


Рис. 4. Частотная зависимость потерь в каналах АВТ: в диапазоне с центральной частотой $f_с$: а – основная мода H_{11} ; б – высшая мода H_{21} ; в диапазоне с центральной частотой $f_н$: в – основная мода H_{11} ; г – высшая мода H_{21}
 Fig. 4. Frequency dependence of losses in AVT channels: in the range with the central frequency $f_с$: а – the main mode H_{11} ; б – high mode H_{21} ; in the range with a central frequency $f_н$: в – the fundamental mode H_{11} ; г – high mode H_{21}

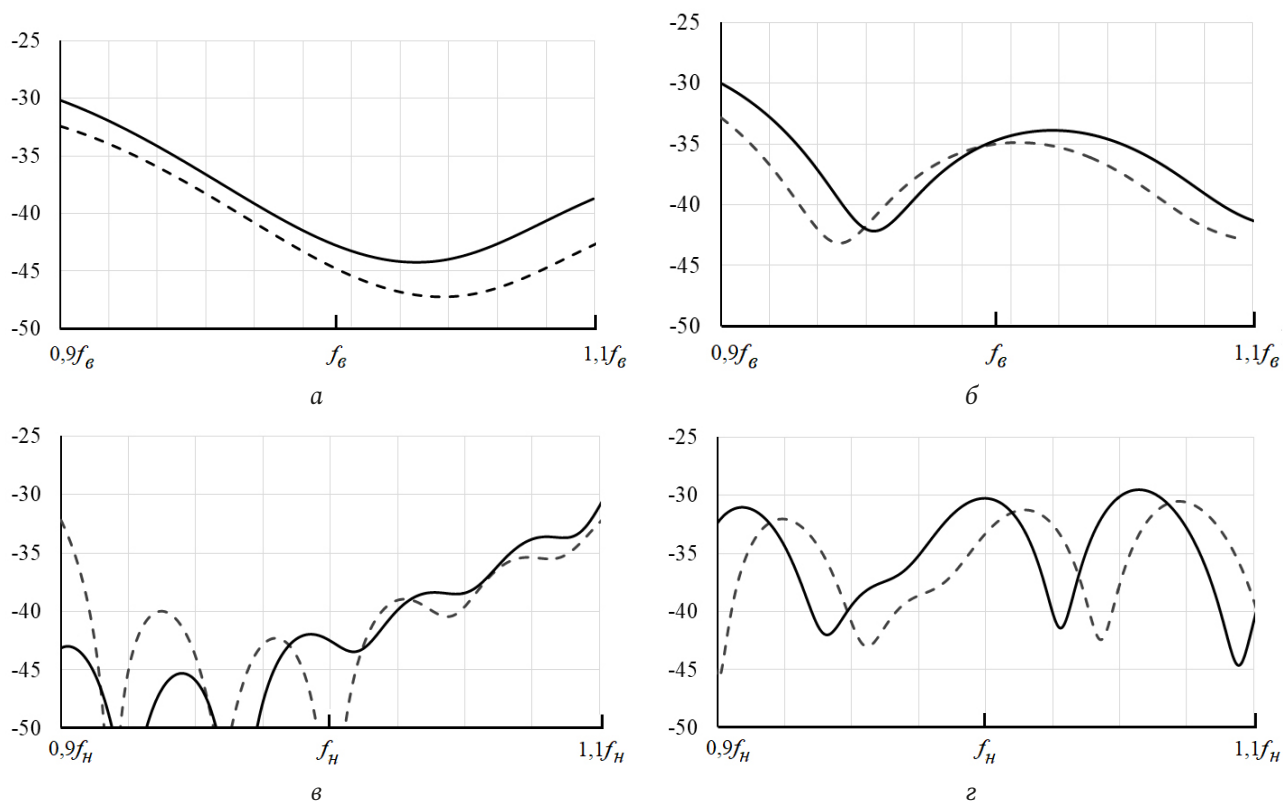


Рис. 5. Частотная зависимость поляризационной развязки для сигналов: в диапазоне с центральной частотой $f_с$: а – линейной; б – круговой; в диапазоне с центральной частотой $f_н$: в – линейной; г – круговой
 Fig. 5. Frequency dependence of polarization isolation for signals: in the range with a central frequency $f_с$: а – linear; б – circular; in the range with a central frequency $f_н$: в – linear; г – circular

способа «разделение по поляризации – разделение по частоте».

Заключение

1. Основные элементы математической модели АВТ, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте».

Использование в качестве основных элементов математической модели матриц, описывающих взаимосвязь сигналов на выходе и входе устройства в составе АВТ, дает возможность получить полноволновое описание распространения полей в каналах АВТ, на основе которого проводить исследования частотных зависимостей основных характеристик (КПД, крутизна пеленгационной характеристики, поляризационная) АВТ, постро-

енного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте». Основным преимуществом предлагаемой математической модели является использование блочных матриц, элементы которых имеют простой физический смысл и могут быть достаточно просто рассчитаны.

2. Теоретико-экспериментальное подтверждение корректности модели АВТ.

Выполненные с использованием пакетов математического моделирования расчеты, теоретические расчеты характеристик устройств, входящих в состав АВТ, вычисление на их основе характеристик всего АВТ и сравнение с результатами экспериментальных измерений подтвердили корректность разработанной математической модели АВТ, построенного на основе способа «разделение по поляризации – разделение по частоте».

Список литературы

1. Антенны УКВ / под ред. Г. З. Айзенберга: в 2 ч. Ч. 2. М.: Связь, 1977. 288 с.
2. Сомов А.М., Старостин В.В., Кабетов Р.В. Антенно-фидерные устройства / под ред. А.М. Сомова. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 404 с.
3. Simultaneous X/Ka-Band feed system for large earth station SATCOM antennas / C. Granet [et al.] // Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS), 11–13 Nov. 2014, Canberra, ACT, Australia. 2014. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/MilCIS.2014.7002726>
4. Сомов А.М., Кабетов Р.В. Проектирование антенно-фидерных устройств / под ред. А.М. Сомова. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 500 с.
5. Сомов А.М. Распространение радиоволн и антенны спутниковых систем связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 456 с.
6. Устройства СВЧ и антенны / под ред. А.А. Филонова. М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 492 с.
7. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 1136 p.
8. Milligan T.A. Modern Antenna Design. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 614 p.
9. Volakis J.L. Antenna Engineering Handbook. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2007. 1755 p.
10. Drabowitch S., Papiernik A., Griffiths H. Modern Antennas. New York: Springer, 2005. 703 p.
11. Козлов В.А., Ивойлова М.М. Применение методов многоуровневого моделирования в проектировании радиочастотных устройств радиотехнических систем // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т. 20, № 3. С. 64–70. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7085>
12. Бойчук С.И., Коровкин А.Е., Юхнов В.И. Методики создания и проверки многодиапазонных антенно-волноводных трактов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 3. С. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.52-58>
13. Способы частотно-поляризационного разделения сигналов в зеркальных антеннах систем спутниковой связи / Д.Д. Габриэлян [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 2. С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.83-90>
14. Бойчук С.И., Коровкин А.Е., Раздоркин Д.Я. Антенно-волноводные устройства с единым рупором для многодиапазонных антенных систем // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 7 (9). С. 202–208. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41117354>
15. Сомов А.М., Кабетов Р.В. Многолучевые зеркальные антенны: геометрия и методы анализа. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 256 с.

Информация об авторе

Бойчук Сергей Игоревич, руководитель группы ФГУП «Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи», г. Ростов-на-Дону, Россия.
Область научных интересов: электродинамика, устройства СВЧ, антенны.
E-mail: rniirs@rniirs.ru

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2024, vol. 27, no. 1, pp. 61–70

DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.1.61-70
UDC 621.396.677
Original Research

Received 27 September 2023
Accepted 30 October 2023
Published 29 March 2024

Mathematical model of an antenna-waveguide path with signal separation by polarization – frequency

Sergey I. Boychuk

FSUE «RNIIRS»
130, Nansen Street,
Rostov-on-Don, 344038, Russia

Abstract – Background. The need to create antenna-waveguide paths for multi-band reflector antennas of satellite communication systems requires the use of various methods for selecting the structure, determining and optimizing the parameters of antenna-waveguide paths. **Aim.** Development of a mathematical model of antenna-waveguide paths of multi-band reflector antennas, built on the basis of the «polarization separation – frequency separation» method with the implementation of the auto-tracking function. **Methods.** A mathematical model of antenna-waveguide paths of multi-band reflector antennas, built on the basis of the «polarization separation – frequency separation» method, allows us to determine the main characteristics of antenna-waveguide paths and incoming devices with an auto-tracking function. **Results.** The main elements of the mathematical model of multi-band antenna-waveguide paths built on the basis of the «polarization separation – frequency separation» method are determined. **Conclusion.** A mathematical model has been proposed that makes it possible to reduce the requirements for the computing tools used when developing antenna-waveguide paths in terms of RAM capacity and performance. The ability to analyze and determine the characteristics of antenna-waveguide paths using a mathematical model has been implemented. The stages of determining the parameters of antenna-waveguide paths are presented, based on the developed mathematical model of the corresponding design option, as well as theoretical and experimental data confirming the correctness of the model of antenna-waveguide paths.

Keywords – antenna-feed path; multiband feed system; mathematical model; separation method «frequency separation – polarization separation»; frequency dependencies characteristics antenna-feed path.

✉ rniirs@rniirs.ru (Sergey I. Boychuk)

 © Sergey I. Boychuk, 2024

References

1. G. Z. Ayzenberg, Ed. *VHF Antennas*, in two chapters, ch. 2. Moscow: Svyaz', 1977. (In Russ.)
2. A. M. Somov, V. V. Starostin, and R. V. Kabetov, *Antenna-Feeder Devices*, A. M. Somov, Ed., Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2014. (In Russ.)
3. C. Granet et al., “Simultaneous X/Ka-Band feed system for large earth station SATCOM antennas,” *Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS)*, 11–13 Nov. 2014, Canberra, ACT, Australia, pp. 1–5, 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/MilCIS.2014.7002726>.
4. A. M. Somov and R. V. Kabetov, *Design of Antenna-Feeder Devices*, A. M. Somov, Ed., Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2015. (In Russ.)
5. A. M. Somov, *Propagation of Radio Waves and Antennas of Satellite Communication Systems*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2016. (In Russ.)
6. A. A. Filonova, Ed. *Microwave Devices and Antennas*. Moscow: INFRA-M, Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2017. (In Russ.)
7. C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
8. T. A. Milligan, *Modern Antenna Design*, 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
9. J. L. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, 4th ed. New York: McGraw Hill, 2007.
10. S. Drabowitch, A. Papiernik, and H. Griffiths, *Modern Antennas*. New York: Springer, 2005.
11. V. A. Kozlov and M. M. Ivoylova, “Application of multilevel modeling methods in the design of radio-frequency devices of radio-engineering systems,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 64–70, 2017, url: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7085>. (In Russ.)
12. S. I. Boychuk and V. I. Yukhnov, “Methods for creating and testing multi-band antenna-waveguide paths,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 52–58, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.52-58>. (In Russ.)
13. D. D. Gabriel'yan et al., “Receiving and transmitting feed of reflector antennas for satellite communication systems,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 83–90, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.83-90>. (In Russ.)

14. S. I. Boychuk and D. Ya. Razdorkin, "Antenna-waveguide devices with a single horn for multi-band antenna systems," *Radiotekhnika*, vol. 83, no. 7 (9), pp. 202–208, 2019, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41117354>. (In Russ.)
15. A. M. Somov and R. V. Kabetov, *Multibeam Mirror Antennas: Geometry and Analysis Methods*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2021. (In Russ.)

Information about the Author

Sergey I. Boychuk, team leader of FSUE «RNIIRS», Rostov-on-Don, Russia.

Research interests: electrodynamics, microwave devices, antennas.

E-mail: rniirs@rniirs.ru

Автор: С. И.

Анализ и проектирование нелинейных временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети / С. И. Бойчук, В. А. Петров. – М.: Радиотехника, 2011. – 330 с.



ISBN 978-5-88070-294-7

УДК 621.372.6:621.372.6

ББК 62.06

Монография посвящена исследованию нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям критическим, которые взаимодействуют с катастрофами и синергетикой. Наука и симбиотическая сложная система, где важна роль коллективов, кооперативных эффектов, взаимодействия порядка – фрактальных структур и турбулентности (или хаоса). В синергетике особое внимание уделяется процессу формирования критической массы, особенно большое число переменных в сложных системах и анализировать эти сложные процессы. Наряду с этим в роли одной из основных характеристик катастрофы и стандартного индикатора Херста рассматривается бифуркация. Обсуждаются эти четыре направления в контексте проектирования и проектирования нейронных сетей, которые в настоящее время активно являются искусством.

Для исторически заданных методов нелинейных фрактальных методов, удовлетворяющих требованиям более глубокой теории хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны стать необходимой частью полного диапазона построения статистических моделей, описанных в книге. В частности, описан детерминированный алгоритм определения временного лага, необходимый для реконструкции аттрактора динамической системы, и модифицированный метод бифуркаций для этих систем, которую можно использовать в качестве индикатора приближения к катастрофе.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных видов анализа, моделирования и проектирования хаотических процессов в нелинейных системах на различных отраслях науки и техники.