

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

Д. Д. Габриэльян<sup>1</sup>, А. Е. Коровкин<sup>1</sup>, С. И. Бойчук<sup>1</sup>,  
С. В. Дворников<sup>2</sup>, М. Р. Бибарсов<sup>2</sup>✉, Г. Ш. Бибарсова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП "РНИИРС", Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup> Военная академия связи, Санкт-Петербург, Россия

✉ [bibarsovmr@rambler.ru](mailto:bibarsovmr@rambler.ru)

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время одной из проблем разработки антенных-фидерных устройств для систем спутниковой связи (ССС) является создание антенно-волноводных трактов многодиапазонных зеркальных антенн (АВТ МЗА), предполагающее построение адекватной математической модели АВТ МЗА без реализации и с реализацией функции автосопровождения, построенного на основе способа "разделение по частоте – разделение по поляризации". Однако существующие математические модели разработаны только для конкретных типов АВТ МЗА, что делает невозможным их использование при разработке новых АВТ МЗА. Предлагаемая модель может применяться при произвольном числе совмещаемых диапазонов частот и видах поляризации.

**Цель работы.** Разработка математической модели АВТ МЗА СССР без реализации и с реализацией функции автосопровождения, построенной на основе способа "разделение по частоте – разделение по поляризации".

**Материалы и методы.** Рассматриваемая математическая модель предполагает описание АВТ МЗА с использованием блочных матриц. Каждая из этих матриц описывает комплексные амплитуды сигналов, возникающих в каждом из устройств АВТ МЗА. Это, в свою очередь, позволяет проанализировать влияние параметров каждого из устройств на характеристики АВТ МЗА СССР в целом при произвольном числе совмещаемых диапазонов частот и видах поляризации.

**Результаты.** Предложены два варианта построения АВТ МЗА СССР. Первый вариант может быть использован в СССР с программным сопровождением, второй вариант – с реализацией моноимпульсного метода сопровождения. Для построения модели АВТ МЗА предложено использовать матричное описание его характеристик, что позволяет в широких пределах варьировать структуру рассматриваемого АВТ МЗА.

**Заключение.** Разработанная математическая модель позволяет описать характеристики каждого из устройств в составе АВТ МЗА с использованием некоторого многополосника. Использование предложенной модели открывает широкие возможности на каждом этапе разработки, производства и отладки контролировать как характеристики каждого из устройств в составе АВТ МЗА, так и коэффициент передачи и поляризационную развязку в каждом частотном диапазоне всего АВТ МЗА в целом. Представленные зависимости дают возможность оценить взаимосвязь между допусками на параметры устройств и пределами изменения характеристик АВТ МЗА.

**Ключевые слова:** антенно-волноводный тракт, многодиапазонная зеркальная антенна, ответвитель моды  $H_{21}$ , поляризация, частотно-поляризационное разделение

**Для цитирования:** Математическая модель антенно-волноводного тракта с разделением сигналов по частоте–поляризации / Д. Д. Габриэльян, А. Е. Коровкин, С. И. Бойчук, С. В. Дворников, М. Р. Бибарсов, Г. Ш. Бибарсова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-4-41-51

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.07.2022; принята к публикации после рецензирования 09.08.2022; опубликована онлайн 28.09.2022



## Mathematical Model of an Antenna-Waveguide Path with Separation of Signals by Frequency–Polarization

Dmitry D. Gabriel'ean<sup>1</sup>, Alexander E. Korovkin<sup>1</sup>, Sergey I. Boychuk<sup>1</sup>,  
Sergey V. Dvornikov<sup>2</sup>, Marat R. Bibarsov<sup>2</sup>✉, Gulnara Sh. Bibarsova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup> Military Telecommunications Academy, St Petersburg, Russia

✉ bibarsovmr@rambler.ru

### Abstract

**Introduction.** The creation of antenna-waveguide paths of multi-band mirror antennas (AWP MMA) is a significant task in the development of antenna-feeder devices for satellite communication systems (SSS). This task involves the construction of an adequate mathematical model of AWP MMA both without and with the implementation of an auto-tracking function built using the "frequency separation – polarization separation" method. However, the existing mathematical models have been developed only for specific AWP MMA types, thus making them unsuitable for the development of new AWP MMA. The model proposed in this paper can be used for an arbitrary number of combined frequency ranges and types of polarization.

**Aim.** Development of a mathematical model of the AWP MMA of SSS both without and with the implementation of an auto-tracking function built using the "frequency separation – polarization separation" method.

**Materials and methods.** The mathematical model under consideration assumes a description of the AWP MMA using block matrices. Each of these matrices describes the complex amplitudes of signals arising in each of the AWP MMA devices. This, in turn, makes it possible to analyze the influence of the parameters of each device on the characteristics of the AWP MMA of SSS as a whole with an arbitrary number of combined frequency ranges and types of polarization.

**Results.** Two options for the construction of AWP MMA of SSS are proposed. The first option can be used in communication system antennas with software support, while the second option is applicable when a monopulse tracking method is implemented. To construct an AWP MMA model, it is proposed to use a matrix description of the characteristics of AWP MMA devices. This allows the structure of the considered AWP MMA to be varied within a wide range.

**Conclusion.** The developed mathematical model makes it possible to describe the characteristics of each of the devices in the AWP MMA system using a certain multipole. The proposed model provides ample opportunities for controlling, at the stages of development, production and debugging, not only the characteristics of each device in the AWP MMA, but also the transmission coefficient and polarization isolation in each frequency range of the entire AWP MMA. The presented dependencies can be used to assess the relationship between parameter tolerances and the limits of changes in the characteristics of the motor vehicle.

**Keywords:** antenna-waveguide path, multi-band mirror antennas, mode coupler  $H_{21}$ , polarization, frequency-polarization separation

**For citation:** Gabriel'ean D. D., Korovkin A. E., Boychuk S. I., Dvornikov S. V., Bibarsov M. R., Bibarsova G. Sh. Mathematical Model of an Antenna-Waveguide Path with Separation of Signals by Frequency-Polarization. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 41–51. doi: 10.32603/1993-8985-2021-25-4-41-51

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 05.07.2022; accepted 09.08.2022; published online 28.09.2022

**Введение.** Антенно-волноводные тракты и рассмотрены достаточно подробно [1–11]. (АВТ) находят широкое применение в качестве Однако разработка и использование антенно-первичного устройства приема и передачи сигналов в различных радиотехнических системах волноводных трактов многодиапазонных зеркальных антенн (АВТ МЗА) в системах спут-

никовой связи (ССС) имеет определенные особенности. Основными задачами, реализуемыми с использованием АВТ МЗА, являются частотно-поляризационное разделение принимаемых сигналов и выделение сигналов для автосопровождения источников радиоизлучения (спутников-ретрансляторов) в ССС. Параметры АВТ МЗА (коэффициент стоячей волны по напряжению на входе и выходе; потери; поляризационные развязки в рабочих диапазонах частот) определяют шумовую добротность антенны и, соответственно, вероятностно-временные характеристики систем связи и передачи данных. Расчет АВТ МЗА является сложной вычислительной задачей даже с использованием большинства современных вычислительных средств. Кроме того, разработку и анализ характеристик АВТ МЗА проще проводить на основе известных характеристик отдельных устройств, входящих в состав АВТ МЗА. Последнее может быть реализовано только с использованием математической модели, описывающей АВТ МЗА как соединение многополюсников, характеристики которых могут быть определены теоретически или экспериментально.

Антенно-волноводные тракты МЗА ССС являются многоканальными системами. Исследование характеристик АВТ в каждом из совмещаемых диапазонов МЗА возможно на осно-

ве матричного описания, являющегося наиболее удобным при рассмотрении многоканальной системы [12]. Однако разработанные в настоящее время существующие математические модели АВТ МЗА определяют характеристики только конкретных типов АВТ МЗА, что делает невозможным их использование при разработке новых АВТ МЗА.

Целью настоящей статьи является разработка математической модели АВТ МЗА ССС без реализации и с реализацией функции автосопровождения, построенной на основе способа "разделение по частоте–разделение по поляризации".

**Математическая модель АВТ МЗА без реализации функции автосопровождения.** Рассмотрим на первом этапе АВТ  $J$ -диапазонной МЗА приема сигналов ССС без режима автосопровождения, обеспечивающую прием и обработку сигналов на основе способа частотно-поляризационного разделения сигналов. Структурная схема такого АВТ МЗА приведена на рис. 1 [13].

В каждом из частотных дуплексеров входная совокупность сигналов делится на две составляющие:

- сигнал, проходящий на устройство поляризационного преобразования и селекции ("основной канал") и далее на соответствующий данному частотному диапазону выход АВТ;
- сигналы более высоких диапазонов ча-

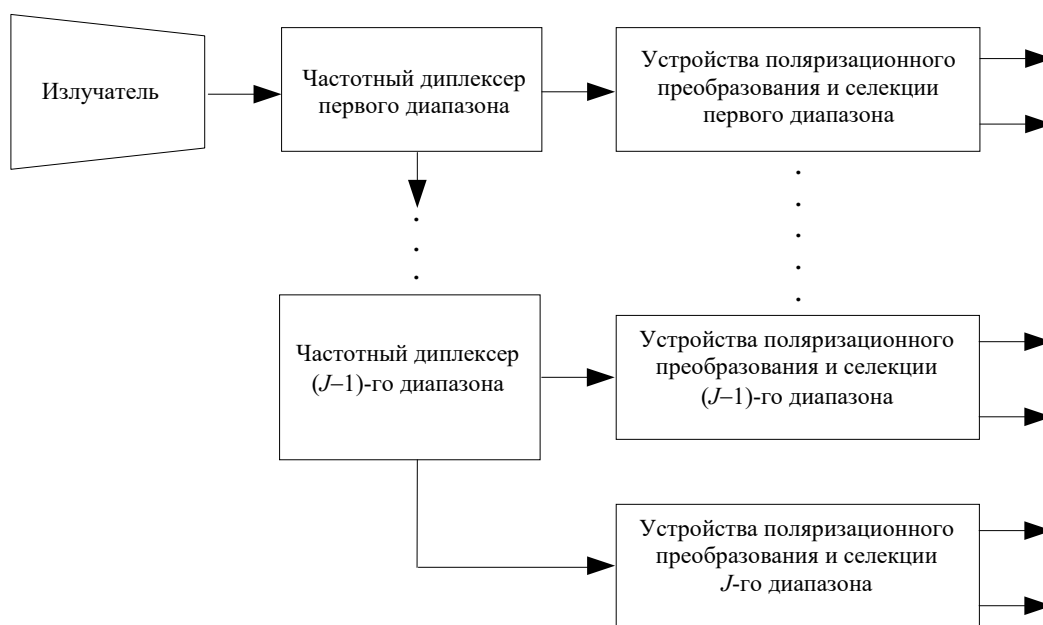


Рис. 1. Структурная схема АВТ МЗА на основе способа "разделение по частоте – по поляризации"

Fig. 1. Structural diagram of AWP MMA based on the method "frequency separation – polarization separation"

стот, проходящие на диплексеры более высоких частотных диапазонов ("проходной канал").

Для рассматриваемой структуры АВТ сигнал на первом выходе (основном канале) диплексера первого (низкочастотного) диапазона может быть представлен в виде

$$V_1^{(\text{осн})} = B_1 \cdot \binom{(1)}{(1)} A \cdot U, \quad (1)$$

где  $V_1^{(\text{осн})T} = (V^{(1)} \ V^{(2)} \ \dots \ V^{(J)})$ ;  $T$  – знак операции транспонирования; матрица  $B_1$  описывает преобразование сигналов в устройстве поляризационного преобразования и селекции первого частотного диапазона; индексы  $\binom{(1)}{(1)}$  перед матрицей  $A$  соответствуют первому частотному диапазону (верхний индекс) и основному каналу первого диплексера (нижний индекс);  $U^T = (U^{(1)} \ U^{(2)} \ \dots \ U^{(J)})$ .

В (1) элементы  $U^{(1)}, U^{(2)}, \dots, U^{(J)}$  имеют блочную структуру размерности  $(Q+1) \times 1$

$$(U^{(j)})^T = \left( U_0^{(j)} \ U_1^{(j)} \ \dots \ U_Q^{(j)} \right), \quad (2)$$

в которой блок  $U_q^{(j)}$ , в свою очередь, имеет вид  $\left( U_q^{(j)} \right)^T = \left( u_{q,1}^{(j)} \ u_{q,2}^{(j)} \right)$  и описывает основную ( $q=0$ ) и высшие ( $q=1, \dots, Q$ ) моды волн, соответствующие данному сигналу; элемент  $u_{q,k}^{(j)}$  определяет комплексную амплитуду  $q$ -й моды в  $j$ -м диапазоне частот, соответствующей  $k$ -му элементу поляризационного базиса ( $k=1, 2$ ).

Структура матрицы  $\binom{(1)}{(1)} A$  определяется следующим выражением:

$$\binom{(1)}{(1)} A = \begin{pmatrix} \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(1,1)} \right) & \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(1,2)} \right) & \dots & \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(1,J)} \right) \\ \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(2,1)} \right) & \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(2,2)} \right) & \dots & \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(2,J)} \right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(J,1)} \right) & \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(J,2)} \right) & \dots & \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(J,J)} \right) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

а каждый блок  $\binom{(1)}{(1)} A^{(j,r)}$  ( $j=1, \dots, J$ ;  $r=1, \dots, J$ ) имеет вид

$$\binom{(1)}{(1)} A^{(j,r)} = \left( \binom{(1)}{(1)} A_0^{(j,r)} \ \binom{(1)}{(1)} A_1^{(j,r)} \ \dots \ \binom{(1)}{(1)} A_Q^{(j,r)} \right);$$

$$\binom{(1)}{(1)} A_q^{(j,r)} = \begin{pmatrix} \binom{(1)}{(1)} a_{q,1,1}^{j,r} & \binom{(1)}{(1)} a_{q,1,2}^{j,r} \\ \binom{(1)}{(1)} a_{q,2,1}^{j,r} & \binom{(1)}{(1)} a_{q,2,2}^{j,r} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Элемент матрицы  $\binom{(1)}{(1)} a_{q,p,k}^{j,r}$  определяет вклад  $p$ -го элемента поляризационного базиса  $q$ -й моды сигнала на входе АВТ в  $r$ -м диапазоне частот в сигнал  $k$ -й составляющей поляризационного базиса  $q$ -й моды сигнала на выходе МЗА в  $j$ -м диапазоне частот сигнала ( $j, r=1, \dots, J$ ;  $p, k=1, \dots, 2$ ;  $q=1, \dots, Q$ ). При  $j=r$  и  $p=k$  коэффициент  $\binom{(1)}{(1)} a_{q,p,k}^{j,r}$  является коэффициентом передачи АВТ для сигнала  $j$ -го частотного диапазона  $p$ -го элемента поляризационного базиса, а при  $p \neq k$  определяет поляризационную развязку сигналов  $q$ -й моды одного диапазона частот. В свою очередь, при  $j \neq r$  и  $p=k$  коэффициент  $\binom{(1)}{(1)} a_{q,p,k}^{j,r}$  определяет частотную развязку  $q$ -й моды сигналов одной поляризации в АВТ.

С достаточной для практического применения точностью можно считать, что на основной выход частотного диплексера первого диапазона сигналы 2...  $J$ -го диапазонов частот не проходят. С учетом этого матрицу  $\binom{(1)}{(1)} A$  можно представить в виде [14]:

$$\binom{(1)}{(1)} A = \begin{pmatrix} \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(1,1)} \right) & \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(1,2)} \right) & \dots & \left( \binom{(1)}{(1)} A^{(1,J)} \right) \\ (0) & (0) & \dots & (0) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (0) & (0) & \dots & (0) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где 0 – блоки соответствующей размерности, элементы которых равны нулю.

На второй выход (проходной канал) частотного диплексера первого диапазона проходят сигналы 2...  $J$ -го диапазонов частот. Указанные сигналы могут быть представлены с использованием матрицы  $\binom{(1)}{(2)} A$  соотношением, аналогичным (1):

$$V_1^{(\text{прох})} = \binom{(1)}{(2)}A \cdot U. \quad (6)$$

Индексы  $\binom{(1)}{(2)}$  перед матрицей  $A$  соответствуют первому, как и в (1), частотному диапазону (верхний индекс) и проходному каналу первого диплексера (нижний индекс).

Матрица  $\binom{(1)}{(2)}A$  имеет вид

$$\binom{(1)}{(2)}A = \begin{pmatrix} (0) & (0) & \dots & (0) \\ \binom{(1)}{(2)}A^{(2,1)} & \binom{(1)}{(2)}A^{(2,2)} & \dots & \binom{(1)}{(2)}A^{(2,J)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \binom{(1)}{(2)}A^{(J,1)} & \binom{(1)}{(2)}A^{(J,2)} & \dots & \binom{(1)}{(2)}A^{(J,J)} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Элементы  $\binom{(1)}{(2)}A^{(j,r)}$  по своей структуре и размерности совпадают с элементами  $\binom{(1)}{(1)}A^{(j,r)}$ .

С учетом представления сигнала на втором выходе частотного диплексера первого частотного диапазона соотношениями (6) и (7) сигнал на выходе АВТ для второго диапазона частот может быть представлен в виде

$$V_2^{(\text{осн})} = B_2 \cdot \binom{(2)}{(1)}A \cdot \binom{(1)}{(2)}A \cdot U, \quad (8)$$

где  $B_2$  – матрица, описывающая преобразование сигналов в устройстве поляризационного преобразования и селекции второго частотного диапазона; индексы  $\binom{(2)}{(1)}$  перед матрицей  $A$  соответствуют второму частотному диапазону (верхний индекс) и основному каналу второго диплексера (нижний индекс).

Матрица  $\binom{(2)}{(1)}A$  определяется следующим образом:

$$\binom{(2)}{(1)}A = \begin{pmatrix} (0) & (0) & \dots & (0) \\ (0) & \binom{(2)}{(1)}A^{(2,2)} & \dots & \binom{(2)}{(1)}A^{(2,J)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (0) & (0) & \dots & (0) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Элементы матрицы имеют аналогичную структуру и физическую трактовку, как и в матрице  $\binom{(1)}{(1)}A$  из (5).

Сигнал  $(J-1)$ -го диапазона частот на выходе основного канала МЗА с учетом изложенного материала может быть представлен соотношением

$$V_{J-1}^{(\text{осн})} = B_{J-1} \cdot \binom{(J-1)}{(1)}A \cdot \binom{(J-2)}{(2)}A \dots \binom{(1)}{(2)}A \cdot U, \quad (10)$$

где входящие в (10) матрицы определяются следующим образом:

$$\binom{(j)}{(1)}A = \begin{pmatrix} (0) & (0) & (0) & (0) & (0) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (0) & \dots & \binom{(j)}{(1)}A^{(j,j)} & \dots & \binom{(j)}{(1)}A^{(j,J)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (0) & (0) & (0) & (0) & (0) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$j \leq J-1;$

$$\binom{(j)}{(2)}A = \begin{pmatrix} (0) & (0) & (0) & (0) & (0) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (0) & \dots & \binom{(j)}{(1)}A^{(j,j)} & \dots & \binom{(j)}{(1)}A^{(j,J)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (0) & (0) & \binom{(j)}{(1)}A^{(J,j)} & \binom{(j)}{(1)}A^{(J,j)} & \binom{(j)}{(1)}A^{(J,j)} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$j \leq J-1.$

Для  $J$ -го диапазона частот выходной сигнал МЗА с учетом структуры построения АВТ определяется выражением

$$V_J^{(\text{осн})} = B_J \cdot \binom{(J-1)}{(2)}A \cdot \binom{(J-2)}{(2)}A \dots \binom{(1)}{(2)}A \cdot U. \quad (13)$$

С основного выхода частотного диплексера каждого из  $1, \dots, (J-1)$ -го частотного диапазонов (за исключением  $J$ -го, самого высокого из совмещаемых диапазонов частот) на устройство поляризационного преобразования и селекции поступают только сигналы одного диапазона частот. Это позволяет обеспечить одномодовый режим распространения волн в устройстве поляризационного преобразования и селекции [15]. В то же время и на второй выход  $(J-1)$ -го частотного диплексера проходит только сигнал  $J$ -го диапазона частот.

С учетом одномодового режима распространения матрица  $B_j$ , описывающая устройство поляризационного преобразования и селекции в каждом диапазоне частот, имеет вид

$$B_j = \begin{pmatrix} b_{1,1}^{(j)} & b_{1,2}^{(j)} \\ b_{2,1}^{(j)} & b_{2,2}^{(j)} \\ b_{3,1}^{(j)} & b_{3,2}^{(j)} \\ b_{4,1}^{(j)} & b_{4,2}^{(j)} \end{pmatrix}_j, \quad (14)$$

где  $b_{p,k}^{(j)}$  – определяет вклад сигнала  $p$ -го элемента поляризационного базиса на входе устройства поляризационного преобразования и селекции в сигнал  $k$ -й составляющей поляризационного базиса в  $j$ -м диапазоне частот.

Приведенные соотношения (1)–(14) позволяют определить такие характеристики АВТ, как коэффициент полезного действия, коэффициент передачи, с использованием которых могут быть найдены отношение сигнал/шум и коэффициент поляризационной развязки в каждом из частотных диапазонов.

**Математическая модель АВТ МЗА с реализацией функции автосопряжения.** Перейдем к рассмотрению АВТ  $J$ -диапазонной МЗА приема сигналов ССС, обеспечивающей режим автосопряжения и обработку сигналов на основе способа разделения сигналов по частоте-поляризации. Режим автосопряжения реализуется путем отбора высшей моды  $H_{21}$ , на основе которой формируется разностная диаграмма направленности (ДН) [15]. Структурная схема АВТ трехдиапазонной МЗА с режимом автосопряжения приведена на рис. 2.

Отличие построения АВТ МЗА с режимом автосопряжения от вышерассмотренного АВТ заключается в использовании дополнительных устройств, обеспечивающих в каждом из частотных диапазонов выделение основного и высшего типов мод принимаемых сигналов. Основная мода, как и в предыдущем случае, используется для обработки и выделения передаваемой информации. Высшая мода в каждом из частотных диапазонов обеспечивает формирование разностного сигнала для реализации режима автосопряжения в каждом из диапазонов частот.

Рассмотрим канал выделения основной моды (суммарный канал  $\Sigma$ ) в каждом из совмещаемых частотных диапазонов. Данный канал

отличается от рассмотренного построения АВТ без автосопряжения только наличием ответвителя моды. Для рассматриваемой структуры АВТ сигнал на выходе основного (суммарного) канала первого (низкочастотного) диапазона может быть представлен в виде

$$V_1^{(\text{осн})} = B_1 \cdot \binom{(1)}{(1)}A \cdot \binom{(1)}{(1)}C \cdot U,$$

где  $\binom{(1)}{(1)}C$  – матрица, описывающая коэффициенты передачи основной моды с выхода облучателя на вход частотного диплексера первого из совмещаемых диапазонов частот. Индексы  $\binom{(1)}{(1)}$  перед матрицей  $C$  обозначают: первый частотный диапазон – верхний индекс; выход суммарного канала – нижний индекс.

Выходной сигнал ответвителя, соответствующий высшей моде принимаемого сигнала, используется для формирования в разностном канале  $\Delta$  разностной диаграммы направленности (ДН), может быть записан в виде

$$V_1^{(\Delta)} = D_1 \cdot \binom{(1)}{(2)}C \cdot U,$$

где  $\binom{(1)}{(2)}C$  – матрица, описывающая коэффициенты передачи высшей моды первого частотного диапазона на вход устройства преобразования и формирования сигнала ошибки. В данном случае нижний индекс "2" обозначает выход ответвителя моды, соответствующего разностному сигналу.

Структура матрицы  $\binom{(1)}{(1)}C$  совпадает со структурой матрицы  $\binom{(1)}{(1)}A$ , определяемой соотношениями (3)–(5), а структура матрицы  $\binom{(1)}{(2)}C$  – со структурой матрицы  $\binom{(1)}{(2)}A$ , представленной соотношением (7).

Аналогично сигнал суммарного канала на выходе частотного диплексера второго частотного диапазона может быть представлен в виде

$$V_2^{(\Sigma)} = B_2 \cdot \binom{(2)}{(1)}A \cdot \binom{(2)}{(1)}C \cdot \binom{(1)}{(2)}A \cdot \binom{(1)}{(1)}C \cdot U, \quad (15)$$

где матрица  $\binom{(2)}{(1)}C$  совпадает по структуре с матрицей  $\binom{(2)}{(1)}A$ , определяемой соотношением (9).



Рис. 2. Структурная схема АВТ трехдиапазонной МЗА с режимом автосопровождения

Fig. 2. Structural diagram of AWP of a three-range MMA with an auto-tracking mode

В свою очередь, сигнал разностного канала на выходе ответвителя высшей моды второго частотного диапазона определяется формулой

$$V_2^{(\Delta)} = D_2 \cdot {}^{(2)}C \cdot {}^{(1)}A \cdot {}^{(1)}C \cdot U.$$

Сигнал  $(J - 1)$ -го диапазона частот на выходе суммарного канала МЗА с учетом изложенного выше материала может быть представлен соотношением

$$V_{J-1}^{(\Sigma)} = B_{J-1} \cdot {}^{(J-1)}A \cdot {}^{(J-1)}C \dots {}^{(1)}A \cdot {}^{(1)}C \cdot U, \quad (16)$$

а сигнал  $J$ -го диапазона частот на выходе суммарного канала МЗА в виде

$$V_J^{(\Sigma)} = B_J \cdot {}^{(J)}C \cdot {}^{(J-1)}A \cdot {}^{(J-1)}C \dots {}^{(1)}A \cdot {}^{(1)}C \cdot U. \quad (17)$$

Сигналы разностных каналов  $(J - 1)$ -го и  $J$ -го диапазонов частот могут быть представлены следующими выражениями:

$$V_{J-1}^{(\Delta)} = D_{J-1} \cdot \binom{J-1}{(2)} C \cdot \binom{J-2}{(1)} A \times \\ \times \binom{J-2}{(1)} C \dots \binom{1}{(1)} A \cdot \binom{1}{(1)} C \cdot U;$$

$$V_J^{(\Delta)} = D_J \cdot \binom{J}{(2)} C \cdot \binom{J-1}{(1)} A \times \\ \times \binom{J-1}{(1)} C \dots \binom{1}{(1)} A \cdot \binom{1}{(1)} C \cdot U.$$

Матрица  $D_j$  совпадает по структуре с матрицей  $B_j$  из (14), а коэффициенты  $d_{p,k}^{(j)}$  определяют вклад сигнала  $p$ -го элемента поляризационного базиса на входе устройства преобразования и формирования сигнала ошибки в сигнал  $k$ -й составляющей поляризационного базиса в  $j$ -м диапазоне частот.

Необходимо отметить, что многдиапазонный АВТ без режима автосопровождения представляет собой частный случай АВТ (рис. 2), при исключении ответвителей моды  $H_{21}$  в каждом из частотных диапазонов. Соответственно, соотношения (15), (16) и (17) в этом

случае преобразуются в выражения (4), (8), (13) при замене матриц  $\binom{J}{(1)} C$  на соответствующие единичные матрицы [14].

**Апробация модели.** Предложенная математическая модель использовалась для разработки макета двухдиапазонного АВТ с соотношением центральных частот 1:6.6. В нижнем диапазоне частот АВТ обеспечивал прием ортогональных круговых и линейных поляризаций в полосе частот 21 %; в верхнем диапазоне частот – прием ортогональных круговых поляризаций в полосе частот 16 %. Расчетные и экспериментальные характеристики разработанного макета АВТ представлены на рис. 3 и 4. Сплошной линией показаны расчетные характеристики, штриховой линией – измеренные характеристики.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что разработанная модель является эффективной при анализе практических схем АВТ, и с учетом допусков определить требуемые параметры АВТ.

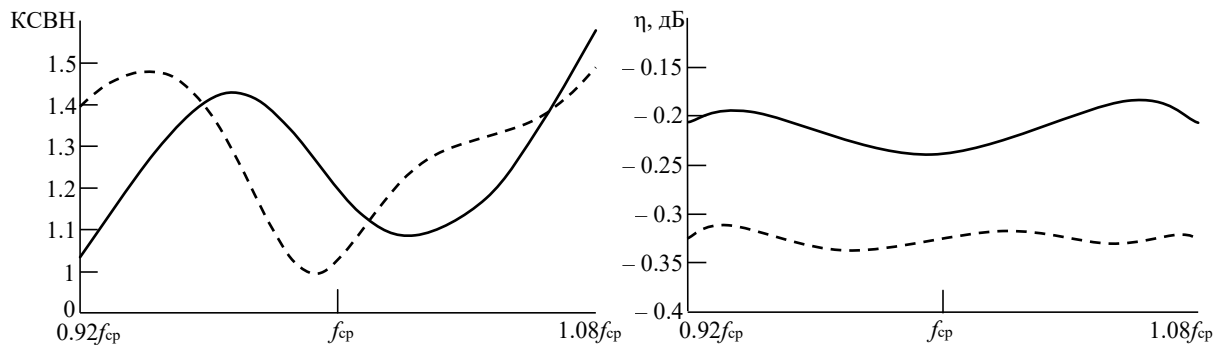


Рис. 3. Характеристики макета АВТ в нижнем диапазоне частот:  $a$  – коэффициент стоячей волны по напряжению на выходе;  $b$  – суммарные потери в АВТ

Fig. 3. Characteristics of the AWP layout in the lower frequency range:  $a$  – standing wave ratio for output voltage;  $b$  – total losses in the AWP

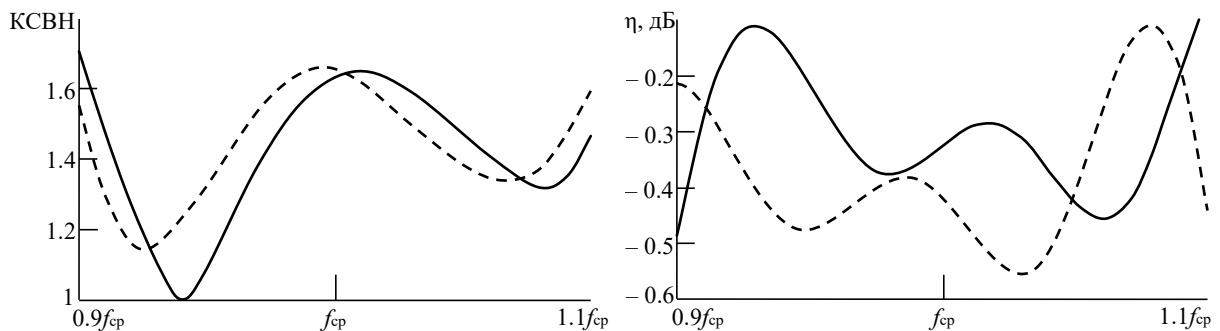


Рис. 4. Характеристики макета АВТ в верхнем диапазоне частот:  $a$  – коэффициент стоячей волны по напряжению на выходе;  $b$  – суммарные потери в АВТ

Fig. 4. Characteristics of the AWP layout in the upper frequency range:  $a$  – standing wave ratio for output voltage;  $b$  – total losses in the AWP



**Заключение.** Представлено современное состояние подхода к описанию АВТ МЗА ССС на основе использования блочных матриц. Преимуществом разработанной математической модели АВТ МЗА ССС является возможность определения параметров каждого из устройств АВТ и их влияния на характеристики АВТ МЗА ССС в целом при произвольном числе совмещаемых диапазонов частот и видах поляризации. Таким образом, в заключение можно сделать следующие выводы:

1. Использование матричного описания характеристик АВТ МЗА дало возможность разработать математическую модель, позволяющую исследовать характеристики многоканальной системы при произвольных значениях параметров каждого из устройств в составе АВТ МЗА. Отличием предлагаемой модели является описание характеристик каждого из устройств в составе АВТ МЗА с использованием некоторого многополюсника, характеристики и параметры которого могут быть достаточно просто рассчитаны или измерены.

2. Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать характеристики АВТ МЗА, в котором первичный отбор сигналов

происходит по частоте с последующим поляризационным разделением. Приведены аналитические соотношения, связывающие произвольные значения коэффициента передачи, поляризационную и частотную развязки. Рассмотрен вариант использования ответвителя моды как возможный вариант реализации АВТ МЗА с автосопровождением.

3. Использование предложенной модели позволяет на всех этапах разработки, производства и отладки прогнозировать характеристики АВТ МЗА в целом с учетом полученных характеристик каждого из устройств в его составе.

4. Разработанная математическая модель АВТ МЗА без реализации и с реализацией функции автосопровождения, построенная на основе способа "разделение по частоте – разделение по поляризации", обуславливает ряд особенностей приема и передачи сигналов, связанных с исследованием закономерностей, определяющих взаимосвязи параметров и характеристик АВТ МЗА. Исследование этих закономерностей авторы рассматривают как дальнейшее направление исследования АВТ МЗА на основе разработанной математической модели, что выходит за рамки настоящей статьи.

#### Авторский вклад

**Дмитрий Давидович Габриэлян** – общая идея построения математической модели АВТ.

**Александр Евгеньевич Коровкин** – теоретическое обоснование АВТ без режима автосопровождения.

**Сергей Игоревич Бойчук** – теоретическое обоснование АВТ с режимом автосопровождения.

**Сергей Викторович Дворников** – компьютерное моделирование.

**Марат Рашидович Бибарсов** – обработка результатов моделирования.

**Гулнара Шихмуратовна Бибарсова** – формирование структуры статьи.

#### Author's contribution

**Dmitry D. Gabrielyan**, the general idea of building a mathematical model of AVT.

**Alexander E. Korovkin**, theoretical justification of automatic transmission without automatic tracking mode.

**Sergey I. Boychuk**, theoretical justification of AVT with automatic tracking mode.

**Sergey V. Dvornikov**, computer modeling.

**Marat R. Bibarsov**, processing of modeling results.

**Gulnara Sh. Bibarsova**, formation of the article structure.

#### Список литературы

1. Сомов А. М., Кабетов Р. В. Многолучевые зеркальные антенны: геометрия и методы анализа. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. 256 с.

2. Коровкин А. Е., Раздоркин Д. Я., Шипулин А. В. Моноимпульсный облучатель зеркальных антенн на высших типах волн // Антенны. 2012. Вып. 9 (184). С. 14–18.

3. Simultaneous X/Ka-Band Feed System for Large

Earth Station SATCOM Antennas / C. Granet, I. M. Davis, J. S. Kot, G. S. Pope, K. Verran // Military Communications and Information Systems Conf. (MilCIS). Canberra, ACT, Australia, 11–13 Nov. 2014. doi: 10.1109/MilCIS.2014.7002726

4. Банков С. Е., Грибанов А. Н., Курушин А. А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. М.: One-

Book, 2013. 419 с.

5. Гурский С. М. Математические модели элементов антенно-волноводных трактов радиолокационных систем с повреждениями // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 2. С. 43–46.

6. Демченко В. И., Косогор А. А., Раздоркин Д. Я. Методология разработки многодиапазонных зеркальных антенн // Антенны. 2012. № 9(184). С. 4–13.

7. Radar Handbook. 3<sup>rd</sup> ed. by M. I. Skolnik. McGraw-Hill, 2008. 1352 p.

8. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. 3<sup>rd</sup> ed. N. J.: John Wiley & Sons, 2005. 1136 p.

9. Miligan T. A. Modern antenna design. 2<sup>nd</sup> ed. N. J.: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 632 p.

10. Volakis J. L. Antenna Engineering Handbook. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, 2007. 1755 p.

11. Modern Antennas / S. Drabowitch, A. Papiernik, H. D. Griffiths, J. Encinas, B. L. Smith. Springer, 2005. 703 p. doi: 10.1007/978-0-387-26231-4

12. Самойленко В. И., Шишов Ю. А. Управление фазированными антенными решетками. М.: Радио и связь, 1983. 240 с.

13. 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.

14. Гантмахер Ф. П. Теория матриц. 4-е изд. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 552 с.

15. Реализация суммарно-разностного метода автосопровождения на основе многомодового облучателя / А. Е. Коровкин, Д. Я. Раздоркин, Н. В. Токарева, А. В. Шипулин // Общие вопр. радиоэлектроники. Ростов н/Д.: ФНПЦ "РНИИРС", 2010. Вып. 1. С. 6–11.

### Информация об авторах

**Габриэлян Дмитрий Давидович** – доктор технических наук (1997), профессор (2000), заместитель начальника научно-технического комплекса Ростовского-на-Дону НИИ радиосвязи. Автор 317 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика, устройства СВЧ, антенны, антенные решетки, комплексные системы связи.

Адрес: ФГУП "РНИИРС", ул. Нансена, д. 130, Ростов-на-Дону, 344038, Россия

E-mail: rniirs@rniirs.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9883-8826>

**Коровкин Александр Евгеньевич** – кандидат технических наук (2020), старший научный сотрудник Ростовского-на-Дону НИИ радиосвязи. Автор 53 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика, гофрированные рупоры, устройства СВЧ, антенны.

Адрес: ФГУП "РНИИРС", ул. Нансена, д. 130, Ростов-на-Дону, 344038, Россия

E-mail: rniirs@rniirs.ru

**Бойчук Сергей Игоревич** – руководитель группы Ростовского-на-Дону НИИ радиосвязи. Автор 22 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика, устройства СВЧ, антенны.

Адрес: ФГУП "РНИИРС", ул. Нансена, д. 130, Ростов-на-Дону, 344038, Россия

E-mail: rniirs@rniirs.ru

**Дворников Сергей Викторович** – доктор технических наук (2009), профессор (2014) кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 417 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника, системы передачи и приема информации, сигнально-кодовые конструкции.

Адрес: Военная академия связи, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: practicsv@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

**Бибарсов Марат Рашидович** – кандидат технических наук (1999), доцент (2007), старший преподаватель кафедры радиосвязи Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 177 научных работ. Сфера научных интересов – системы передачи и приема информации, адаптивные антенные системы.

Адрес: Военная академия связи, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: Bibarsovmr@rambler.ru

**Бибарсова Гульнара Шихмуратовна** – кандидат педагогических наук (2006), доцент кафедры военно-политической работы в войсках (силах) Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Автор 102 научных работ. Сфера научных интересов – правовое обеспечение информационных и коммуникационных технологий.

Адрес: Военная академия связи, пр. Тихорецкий, д. 3, Санкт-Петербург, 194064, Россия

E-mail: bgsh2@rambler.ru

### References

1. Somov A. M., Kabetov R. V. *Mnogoluchevye zerkal'nye anteny: geometriya i metody analiza* [Multipath Mirror Antennas: Geometry and Methods of

Analysis]. Moscow, *Goryachaya liniya-Telekom*, 2021, 256 p. (In Russ.)

2. Korovkin A. E., Razdorokin D. Yu., Shipulin A. V.

50 **Математическая модель антенно-волноводного тракта с разделением сигналов по частоте–поляризации**  
**Mathematical Model of an Antenna-Waveguide Path with Separation of Signals by Frequency–Polarization**

Monopulse Mirror Feed System Antennas at the Higher Types of Waves. *J. Antennas*. 2012, vol. 9 (184), pp. 14–18. (In Russ.)

3. Granet C., Davis I. M., Kot J. S., Pope G. S., Verran K. Simultaneous X/Ka-Band Feed System for Large Earth Station SATCOM Antennas. *Military Communications and Information Systems Conf. (MilCIS)*, 11–13 Nov. 2014 Canberra, ACT, Australia. doi: 10.1109/MilCIS.2014.7002726

4. Bankov S. E., Griбанov A. N., Kurushin A. A. *Electromagnetic Design Antennas and Microwave Structures with FEKO*. Mow, OneBook, 2013, 419 p.

5. Gursky S. M. Mathematical Models of Elements of the Antenna/Waveguide Paths of Radar Systems with Damage. *Modern High-Tech Technologies*. 2019, no. 2, pp. 43–46. (In Russ.)

6. Demchenko V. I., Kosogor A. A., Razdorkin D. Ya. Methodology for Developing Multi-Band Reflector Antennas. *J. Antennas*. 2012, vol. 9 (184), pp. 4–13. (In Russ.)

7. *Radar Handbook*. 3<sup>rd</sup> ed. by M. I. Skolnik. McGraw-Hill, 2008, 1352 p.

8. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, 1136 p.

9. Miligan T. A. *Modern Antenna Design*. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, 632 p.

10. Volakis J. L. *Antenna Engineering Handbook*. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, 2007, 1755 p.

11. Drabowitch S., Papiernik A., Griffiths H. D., Encinas J., Smith B. L. *Modern Antennas*. Springer, 2005, 703 p. doi: 10.1007/978-0-387-26231-4

12. Samoylenko V. I., Shishov Yu. A. *Upravlenie fazirovannymi antennymi reshetkami* [Control of Phased Antenna Arrays]. Moscow, *Radio and svyaz*, 1983, 240 p. (In Russ.)

13. Boychuk S. I., Korovkin A. E., Razdorkin D. Ya. Antenna – Waveguide Devices with a Single Horn for the Multi-Band Antenna Systems. *Radio Engineering*. 2019, vol. 83, no. 7(9), pp. 202–208. (In Russ.)

14. Gantmacher F. R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, *Nauka*, 1988, 552 p. (In Russ.)

15. Korovkin A. E., Razdorkin D. Ya., Tokareva N. V., Shipulin A. V. Implementation of the Sum-Difference Autotracking Method Based on a Multimode Feed. *General Problems of Radio Electronics*. Rostov-on-Don, Federal Scientific and Practical Center "RNIIRS", 2010, vol. 1, pp. 6–11. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Dmitry D. Gabrielyan**, Dr Sci. (Eng.) (1997), Professor (2000), Deputy Head of the Scientific and Technical Complex of the Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications. The author of 317 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics; microwave devices; antennas; antenna arrays; complex communication systems.

Address: FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", 130, Nansen St., Rostov-on-Don 344038, Russia

E-mail: rniirs@rniirs.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9883-8826>

**Alexander E. Korovkin**, Cand. Sci. (Eng.) (2020), Senior Researcher of the Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications. The author of 53 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics; corrugated horns; microwave devices; antennas.

Address: FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", 130, Nansen St., Rostov-on-Don 344038, Russia

E-mail: rniirs@rniirs.ru

**Sergey I. Boychuk**, Head of the Rostov-on-Don group of the Research Institute of Radio Communications. The author of 22 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics; microwave devices; antennas.

Address: FSUE "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communications", 130, Nansen St., Rostov-on-Don 344038, Russia

E-mail: rniirs@rniirs.ru

**Sergey V. Dvornikov**, Dr Sci. (Eng.) (2009), Professor (2014) of the Radio Communication Department of the Military Telecommunications Academy. The author of 417 scientific publications. Area of expertise: radio technology; information transmission and reception systems; signal-code structures.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: practicsv@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

**Marat R. Bibarsov**, Cand. Sci. (Eng.) (1999), Associate Professor (2007), Senior Lecturer of the Radio Communications Department of the Military Telecommunications Academy. The author of 177 scientific publications. Area of expertise: information transmission and reception systems; adaptive antenna systems.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: bibarsovmr@rambler.ru

**Gulnara Sh. Bibarsova**, Cand. Sci. (Pedagogical) (2006), Associate Professor of the Department of Military-Political Work in the Troops (forces) of the Military Telecommunications Academy. The author of 102 scientific publications. Area of expertise: legal support of information and communication technologies.

Address: Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Ave., St Petersburg 194064, Russia

E-mail: bgsh2@rambler.ru