

ВОЛНОВОДНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ МОНОИМПУЛЬСНОЙ АНТЕННЫ С ЧАСТОТНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

Сучков Александр Владимирович

ведущий инженер АО научно-производственное объединение
«Лянозовский электромеханический завод».

E-mail: avsu@bk.ru.

Адрес: 127411, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 110.

Аннотация: Разработана волноводная система питания для моноимпульсной частотно-сканирующей антенны X-диапазона. Антенна, представляющая собой плоскую решётку линейных волноводных излучателей, соединённых с волноводной системой питания, предназначена для формирования суммарной и разностной диаграмм направленности в плоскости частотного сканирования. В ортогональной плоскости сканирования антенна формирует диаграммы направленности косекансного типа. Исследованы особенности предлагаемой последовательной суммарно-разностной схемы формирования луча, приведены способы устранения характерных для неё недостатков. Рассмотрены методики численного анализа и оптимизации параметров электродинамической модели устройства, которые позволяют получить хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Обсуждаются вопросы конструктивно-технологической реализации. В заключение приведён сравнительный анализ экспериментально измеренных характеристик изготовленного опытного образца устройства с характеристиками, полученными при моделировании. Намечены пути развития темы исследований волноводных систем питания моноимпульсных частотно-сканирующих антенных решёток X-диапазона частот.

Ключевые слова: волноводная система питания, многоканальный делитель мощности, моноимпульсная антенная решётка, частотное сканирование, численное моделирование.

Введение

В настоящее время в условиях роста требований к точностным и эксплуатационным характеристикам современных аэродромных радиолокационных систем (РЛС) [1], практически исключена возможность применения в их составе ранее разработанных [2] антенных решёток с частотным сканированием (АРЧС). Поскольку одноканальное построение таких антенн, обеспечивающее в плоскости частотного сканирования формирование многолучевой диаграммы направленности (ДН), позволяет определять направление на цель методом интерполяции угловой координаты при одновременном сравнении амплитуд эхо-сигналов, принятых независимыми каналами смежных лучей. Недостатком этого метода, реализованного в ряде отечественных и зарубежных РЛС с частотным сканированием [2, 3], является ограничение возможности увеличения точности измерения угловой координаты вследствие наличия декорреляции сравниваемых эхо-сигналов в смежных лучах, формируемых на

разнесенных частотах. Кроме того, уровень боковых лепестков (УБЛ) ДН в плоскости частотного сканирования (порядка -20 дБ), достигаемый при построении многоканальной системы питания излучателей (делителя мощности) на ненаправленных ответвителях [2], на практике не всегда достаточен для обеспечения эффективности функционирования РЛС в условиях пассивных помех. Устранить указанные недостатки, сохранив при этом основные достоинства в части технологической реализации линии задержки и излучателей одноканальных АРЧС, представилось возможным за счёт кардинальной переработки структуры многоканального делителя мощности (ДМ), позволяющей реализовать в нём суммарно-разностную волноводную систему питания и, соответственно, моноимпульсный метод измерения угловой координаты в пределах каждого луча на фиксированной частоте эхо-сигнала. Необходимо отметить, что имеется ряд работ [3 - 6] по теоретическим и экспериментальным [5] исследованиям волноводных систем пита-

ния моноимпульсных АРЧС S-диапазона частот. Однако одним из перспективных направлений также является освоение таких устройств в X-диапазоне с целью их применения в составе моноимпульсных АРЧС радиолокационных систем посадки (РСП). Известно, что РСП является важной составной частью системы управления воздушным движением в аэродромной зоне [7]. Для обеспечения требуемой зоны обзора с заданными точностными характеристиками и повышения эффективности функционирования в условиях пассивных помех, РСП строятся с использованием моноимпульсных антенн - курсовой и глиссальной в азимутальной и угломестной плоскостях соответственно [7, 8].

В данной работе основное внимание уделено теоретическим и экспериментальным исследованиям волноводной системы питания (далее по тексту – многоканального ДМ), моноимпульсной АРЧС X-диапазона, предназначенной для применения в качестве курсовой антенны РСП.

Схема построения

На основе анализа требований к характеристикам моноимпульсной АРЧС, имеющихся наработок по техническим, конструктивным и технологическим решениям [5], а также известных вариантов построения многоканальных ДМ (на основе последовательной [3-5] или параллельной [3] системы питания) для реализации в X-диапазоне частот предложена 66-канальная суммарно-разностная схема, пред-

ставленная на рис. 1.

Многоканальный ДМ, состоящий из 2-х волноводных делителей бегущей волны в виде свёрнутых в E-плоскости синусоидальных линий задержки (ЛЗ 1 и ЛЗ 2), запитанных от волноводного моста (ВМ) с регулируемым коэффициентом деления [9] и T-образных элементов связи [10] ЛЗ с выходами, спроектирован таким образом, чтобы обеспечить в относительной полосе частот 4,3% при работе в составе АРЧС: 1) формирование спадающего амплитудного распределения (АР) в горизонтальной плоскости с целью получения суммарной ДН с шириной на уровне -3 дБ порядка $1,4^\circ \pm 0,1^\circ$ и УБЛ не более -27 дБ при размере раскрыва антенны 1,5 м; 2) формирование фазового распределения (ФР) в раскрыве, необходимого для управления положением луча ДН в азимутальной плоскости в угловом секторе $\pm 17,5^\circ$ методом частотного сканирования; 3) возможность синфазной и противофазной запитки половин раскрыва АРЧС для формирования в горизонтальной плоскости требуемых суммарной и разностной ДН с уровнем пересечения $-4 \pm 0,5$ дБ; 4) возможность запитки линий задержки ДМ в требуемом амплитудно-фазовом соотношении для достижения в разностном канале глубины нуля ДН не более -30 дБ и различия уровней сигналов в максимумах ДН не более $\pm 0,5$ дБ; 5) минимизацию искажений амплитудно-фазового распределения (АФР) в рабочем диапазоне частот при конечном уровне согласования излучателей АРЧС; 6) минимизацию потерь мощности в синусои-

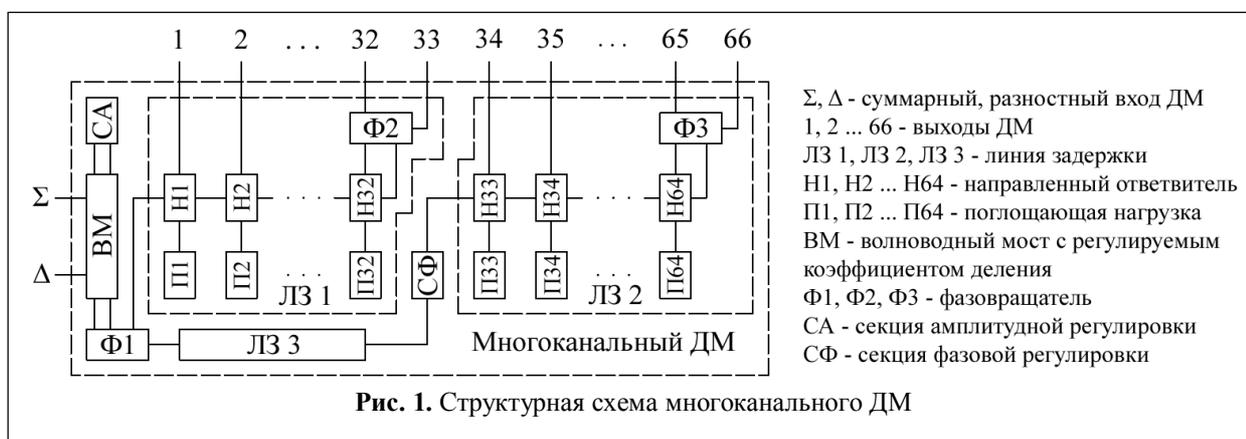


Рис. 1. Структурная схема многоканального ДМ

дальних линиях задержки; 7) уровень развязки между суммарным (Σ) и разностным (Δ) каналами не менее 20 дБ.

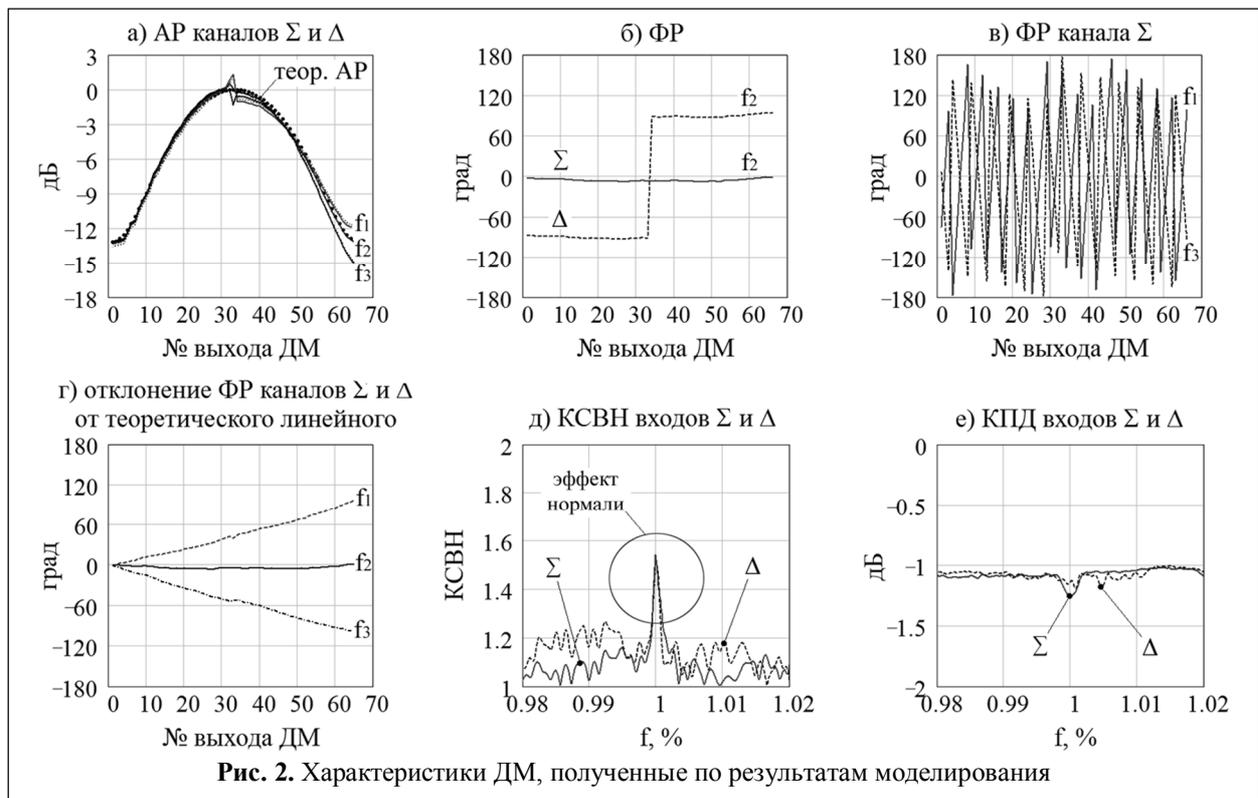
Каждый из волноводных делителей мощности бегущей волны построен на базе 32-х Т-щелевых направленных ответвителей (Н1, Н2 ... Н64), включённых с регулярным интервалом между изогнутыми волноводными участками специальной конфигурации (петлями), соединёнными последовательно и образующими свёрнутую в Е-плоскости синусоидальную линию задержки (ЛЗ 1, ЛЗ 2). К балансным плечам направленных ответвителей подключены волноводные поглощающие нагрузки (П1, П2 ... П64). Перед 2-м делителем мощности (ЛЗ 2) включена волноводная линия задержки (ЛЗ 3), создающая дополнительный фазовый набег на элементах с 34 по 66-й. ВМ запитывает в требуемом амплитудном соотношении делители ЛЗ 1 и ЛЗ 2: синфазно при подаче сигнала на суммарный вход (Σ) или в противофазе при подаче сигнала на разностный вход (Δ). В составе схемы многоканального ДМ имеются также двухканальные волноводные фазовращатели ($\Phi 1$, $\Phi 2$ и $\Phi 3$), а

также секции амплитудной и фазовой регулировки (СА и СФ), назначение и принцип работы которых рассмотрены в [5].

Оценка параметров и моделирование

Расчёт основных геометрических размеров волноводной топологии, определяющих электрические характеристики ДМ, произведён в соответствии с методикой, изложенной в [5], исходя из компромисса между приемлемостью конструктивного исполнения и КПД предложенной схемы с учётом требуемой ширины луча ДН в горизонтальной плоскости, рабочего диапазона частот и сектора сканирования [3].

В соответствии с рассчитанной геометрией устройства с целью численного анализа и оптимизации характеристик [5] методом конечных элементов [11] в среде Ansys Hfss, разработана трёхмерная электродинамическая модель ДМ, структура которой полностью соответствует схеме построения (рис. 1) и представляет собой воздушную полость волноводной топологии с заданными соответствующим образом граничными условиями для имитации материала волноводных стенок (алюминиевый



сплав ВД-95 с шероховатостью 1,2 мкм), а также волноводных входов и выходов, возбуждаемых основным типом колебаний H_{10} .

Для оценки влияния допусковых погрешностей, определяемых технологией изготовления, размеры модели заложены со случайными отклонениями $\pm 0,05$ мм от расчётных. Характеристики ДМ на нижней f_1 , и верхней f_2 частотах, а также на частоте нормали f_3 , полученные по результатам моделирования, представлены на рис. 2.

Конструктивно-технологическое исполнение

Конструктивно ДМ состоит из 2-х алюминиевых плит, в которых на станке с числовым программным управлением (ЧПУ) профрезерована волноводная топология — профиль волновода, окна связи направленных ответвителей (НО) и прочие составные элементы схемы (рис. 3).

Стыковка плит производится по линии нулевых токов топологии. В балансных плечах НО установлены 64 клина, выполненных из поглощающего состава на основе карбонильного железа и разрезанных для обеспечения удобства сборки блока по линии стыковки алюминиевых плит. ДМ имеет 2 волноводных входа на торцевой стороне Σ и Δ , 66 волноводных выходов 1,2...66, расположенных на фронтальной стороне с шагом 23 мм, а также вынесенные на периферию блока секции ам-

плитудной и фазовой регулировки – СА и СФ, соответственно. Для обеспечения механической развязки при плотном шаге установки излучателей в АРЧС четные и нечетные выходы блока разнесены. Топология ДМ выполнена на базе волновода сечения $21,4 \times 6$ мм. Входы и выходы устройства выполнены на базе волновода стандартного сечения 23×10 мм. Фрезеровка волноводной топологии и поперечных щелей Т-образных элементов связи НО производится с помощью стандартных торцевых фрез. Продольные щели Т-образных элементов связи в процессе фрезеровки плит блока прорезаются с помощью грибковой фрезы [10]. Для получения минимальных потерь на частотах X-диапазона чистота обработки поверхностей волноводной топологии должна обеспечиваться в пределах 0,8-1,6 мкм. Выбор охлаждающих составов, соотношения скоростей резания и подачи для заданной чистоты обработки производится экспериментально.

Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что рекомендации по преодолению известных недостатков последовательной моноимпульсной схемы формирования луча, рассмотренные ранее в [5] для S-диапазона частот, также применимы к многоканальным ДМ X-диапазона при условии ужесточения требований к допускам изготовления конструкции.

На основании проведённых исследований

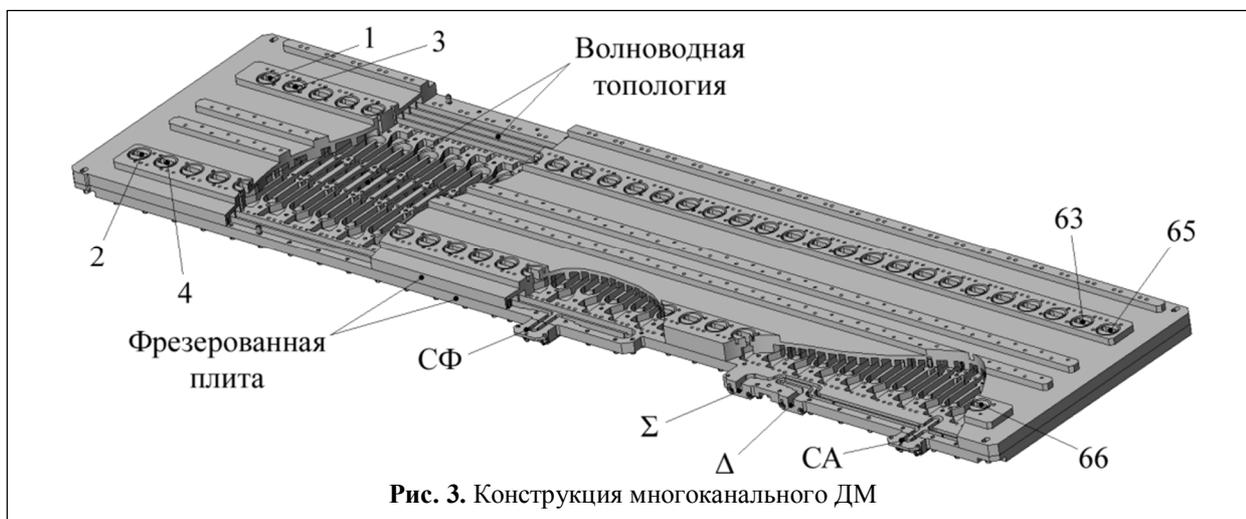


Рис. 3. Конструкция многоканального ДМ

разработана конструкторская документация волноводного многоканального ДМ 274АА02, изготовлен опытный образец, работающий в относительной полосе 4,3%, испытания которого подтвердили корректность выполненных теоретических и модельных расчётов, а также заложенных конструктивно-технологических решений, и показали хорошее совпадение экспериментально измеренных характеристик с теоретическими. Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L N5230C. АФР, измеренное на выходах ДМ, соответствует АФР, полученному при моделировании, (рис. 2, а—г) с отклонениями не более $\pm 0,4$ дБ и $\pm 5^\circ$, что позволяет обеспечить требуемое качество ДН суммарного и разностного каналов в плоскости частотного сканирования. Измеренная зависимость КСВН суммарного и разностного входов ДМ от частоты имеет отклонения от расчётной характеристики (рис. 2, д) не более $\pm 0,1$ в рабочем диапазоне. При реализованной шероховатости топологии порядка 1,6 мкм КПД ДМ, оцененный по результатам измерений, оказался ниже расчетного (рис. 2, е) на 0,3 дБ.

Таким образом, основное внимание в работе было уделено исследованию высокотехнологичной низкопрофильной конструкции волноводной системы питания, построенной на основе Т-щелевых направленных ответвителей, и позволяющей использовать при её конструктивной реализации станки с ЧПУ, которые обеспечивают высокую точность изготовления и, соответственно, требуемое высокое качество технических характеристик, а также их повторяемость при серийном производстве. Рассмотрены конструктивные и технологические вопросы, позволяющие обеспечить требуемую точность изготовления разработанного устройства. Предложенные усовершенствования известной суммарно-разностной схемы с последовательным питанием излучателей [3] в части организации полного вывода мощности на крайние элементы половин схемы, применения двухканальных фазовращателей и волноводного моста с регулируемым коэффициентом де-

ления позволили реализовать на практике низкопрофильную конструкцию волноводной суммарно-разностной системы питания на базе двух фрезерованных алюминиевых плит и устранить необходимость применения в её составе окончательных нагрузок.

На основе анализа экспериментально измеренных характеристик можно сделать вывод о корректности выполненных теоретических и модельных расчётов, а также принятых к реализации конструктивных и технологических решений.

В заключение следует отметить, что вполне очевидный путь развития темы исследований волноводных систем питания моноимпульсных частотно-сканирующих антенн Х-диапазона представляется в поиске методов, направленных на повышение КПД и устранение «эффекта нормали» за счёт улучшения чистоты обработки и снижения влияния допусковых погрешностей изготовления на электрические характеристики, а также в рассмотрении вопросов реализации конструкции на основе перспективной SIW-технологии [12].

Литература

1. Справочник по радиолокации. Книга 1 / под ред. М.И. Скольника: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
2. Бородин Н.Д., Ковалев В.Т., Ленци Ю.И., Немоляев А.И. Волноводно-щелевые антенные решетки с частотным сканированием // Доклады XVII научно-технической конференции ВНИИРТ. – М.: ОАО «ВНИИРТ», 2007. – С. 312-317.
3. Johnson R.C., Jasik H. Antenna Engineering Handbook. 3d Edition.– New York: McGraw-Hill Book Company, 1993.
4. Патент № 2490760 С1 (RU), МПК H01Q 3/00. Моноимпульсная антенна с частотным сканированием / Н.Д. Бородин, М.В. Исаков; заявитель и патентообладатель ОАО «НПП «Салют». – № 2012111088/08. – Заявл. 23.03.2012. – Оpubл. 20.08.2013. – Бюл. № 23.
5. Сучков А.В. Моноимпульсная волноводно-щелевая антенная решётка с частотным сканированием // Труды МАИ. – 2016. – №86. – С. 1-26.
6. Wang H., Ni J., Sun W. Z., Ma X. F., Sheng W. X. A Novel Frequency Scanning Monopulse Microstrip Antenna Array // 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – 2010. – P. 1118-1121.

7. Николаев С.Ф., Сеницын Е.А., Сеницын В.А. Радиолокатор «Низовье» обеспечит безопасность на взлетной полосе // Инновационная Россия. Исследования и разработки. – 2009. – № 9. – С. 18-19.

8. Патент № 2556708 С1 (RU), МПК G01S13/52. Посадочный радиолокатор / В.П. Иванов, В.М. Король, Е.А. Сеницын, А.Ю. Коршунов; заявитель и патентообладатель ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей». – № 2014110066/07. – Заявл. 17.03.2014. – Оpubл. 20.07.2015.

9. Сучков А.В. Волноводное мостовое устройство с регулируемым коэффициентом деления // 25-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМи-Ко'15.– Севастополь, 2015. – С. 566-568.

10. Сучков А.В. Характеристики и практическое применение технологичной конструкции волноводного Т-щелевого направленного ответвителя // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2015. – № 12. – С. 40-43.

11. Гринева А.Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики / Учеб. Пособие. – М.: Радиотехника, 2012. – 336 с.

12. Peters F.D.L., Tatu S.O., Denidni T.A. Design of Beamforming Slot Antenna Arrays Using Substrate Integrated Waveguide // IEEE Conference Publications. Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2012. – P. 1-2.

Поступила 28 августа 2016 г.

English

The waveguide power system of the frequency scanning monopulse antenna

Alexander Vladimirovich Suchkov – Senior Engineer JSC Research & Production Corporation «Lianozovo Electromechanical Plant».

E-mail: avsu@bk.ru.

Address: 110 Dmitrovskoe shosse, 127411 Moscow, Russia.

Abstract: Development of reliable, unattended, scanning antennas with no controlled elements is a timely scientific and technical task in the context of growing requirements to modern airfield radar systems (RS) regarding the measuring accuracy of coordinates and operation performance (in operation in any climatic areas). It is known that the method of frequency scanning in comparison with other inertialess scanning methods is more economic, rather simple and reliable. However the disadvantage of this method implemented in a number of the domestic and foreign RS constructed on the basis of single-channel frequency scanning antenna arrays (FSAA) is restriction of possibility to enhance measuring accuracy of angular coordinate due to decorrelation of the compared echo signals in the adjacent beams formed in spaced frequencies. It became possible to eliminate this disadvantage and yet to keep the main advantages regarding technology implementation of delay line and radiating elements of commercially available single-channel FSAA due to drastic processing of the multichannel power divider (PD) structure enabling to implement cumulatively differential waveguide power system and, respectively, a monopulse method of angular coordinate measurement within each beam in echo signal fixed frequency. Theoretical and experimental research results of the waveguide power system for monopulse X-range FSAA intended for using as the homing antenna of ground controlled approach system are provided in this work. FSAA is made on the basis of the linear waveguide radiating elements connected to the waveguide power system which creates cumulatively differential PD in the frequency scanning plane (azimuthal plane). Antenna forms cosecant type DP in the orthogonal scanning plane (elevation plane). Specific nature of phase error elimination and amplitude balancing of cumulatively differential waveguide power system of consecutive type is examined. Problems of constructive and technological implementation of the waveguide power system are considered. Special attention is paid to study of technological low-profile system structure based on T-slot-hole directed couplers and enabling to use numerical control (NC) machines in its design as they ensure high manufacturing accuracy and, respectively, the required quality of technical performance, and also their recurrence in batch production. Results of experimental performance measurements of the made prototype device are given. The carried-out comparative analysis demonstrated good matching of experimental performance to the theoretical results received in computational modeling. We can draw a conclusion grounded on the analysis of experimentally measured characteristics about the validity of the carried out theoretical and model calculations, and of the made constructive and technological decisions.

Key words: the waveguide power system, multichannel power divider, monopulse antenna array, frequency scanning, computational modeling.

References

1. Radar handbook. Book 1/Ed. by M. I. Skolnik: Transl. from Engl. - M.: Tekhnosfera, 2014. - 672 p.

2. Borodin N. D., Kovalyov V. T., Lentsi Yu.I., Nemolyaev A.I. Waveguide and slot-hole frequency scanning antenna arrays. - Reports of the XVII VNIIRT scientific and technical conference. - M.: JSC VNIIRT, 2007. – P. 312-317.
3. Johnson R.C., Jasik H. Antenna Engineering Handbook. the 3D Edition. - New York: McGraw-Hill Book Company, 1993.
4. Patent No. 2490760 C1 (RU), MPK H01Q 3/00. Monopulse frequency scanning antenna. - N. D. Borodin, M. V. Isakov; applicant and patent holder JSC NPP Salyut. - No. 2012111088/08. - Appl. 23.03.2012. - Publ. 20.08.2013. - Bulletin No. 23.
5. Suchkov A.V. The monopulse waveguide and slot-hole frequency scanning antenna array. - MAI Works. - 2016. - No. 86. – P. 1-26.
6. Wang H., Ni J., Sun W. Z., Ma X. F., Sheng W. X. A Novel Frequency Scanning Monopulse Microstrip Antenna Array. - 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). - 2010. - P. 1118-1121.
7. Nikolaev S.F., Sinitsyn E.A., Sinitsyn V.A. Radar Nizovye will ensure safety in the runway. - Innovative Russia. Research and development. - 2009. - No. 9. – P. 18-19.
8. Patent No. 2556708 C1 (RU), MPK G01S13/52. Landing radar. - B.П. Ivanov, V. M. Korol, E.A. Sinitsyn, A.Yu. Korshunov; applicant and patent holder JSC Air Defence Concern Almaz Antey. - No. 2014110066/07. - Appl. 17.03.2014. - Publ. 20.07.2015.
9. Suchkov A.V. The waveguide bridge device with controlled division ratio. - the 25th International Conference "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies" of Krymiko '15. - Sevastopol, 2015. – P. 566-568.
10. Suchkov A.V. Characteristics and practical application of technological construction of the waveguide T-slot-hole directed coupler. - Modern science: vital problems in theory and practice. "Estestvennye i tekhnicheskiye nauki" issue. - 2015. - No. 12. – P. 40-43.
11. Grinev A.Yu. Numerical methods of a solution of electrodynamics applied problems. - Study Guide. - M.: Radiotekhnika, 2012. - 336 p.
12. Peters F.D.L., Tatu S.O., Denidni T.A. Design of Beamforming Slot Antenna Arrays Using Substrate Integrated Waveguide. - IEEE Conference Publications. Antennas and Propagation Society International Symposium. - 2012. - P. 1-2.