

**ДИАГРАМООБРАЗУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ШИРОКОПОЛОСНОЙ АФАР****Самбуров Николай Викторович**

начальник отдела АО «Тайфун»

E-mail: [samburov.n.v@yandex.ru](mailto:samburov.n.v@yandex.ru)**Требин Михаил Владимирович**

руководитель группы ОАО «Тайфун»

E-mail: [mtrebin@gmail.com](mailto:mtrebin@gmail.com)

Адрес: 248009, Российская Федерация, г. Калуга, ул. Грабцевское шоссе, д. 174.

**Аннотация:** В статье приводятся подходы к синтезу антенных устройств для организации ряда пространственных каналов для радиолокации и обмена информацией для станций различного функционального назначения: радиолокации, вторичной радиолокации и других. Использование единого антенного устройства радиолокационными станциями различного назначения и рабочих диапазонов требует обеспечения оперативного переключения между станциями и формирование ряда ДН обнаружения и подавления. Поэтому получившие широкое распространение антенные системы с механическим сканированием не удовлетворяют данному требованию. Приводится построение многофункционального антенного устройства на базе активной фазированной антенной решётки (АФАР) для работы в составе станций различного функционального назначения. Анализируются варианты построения диаграммообразующего устройства данной многофункциональной АФАР. Описывается синтезированное диаграммообразующее устройства для работы в широком диапазоне частот. Приводятся ряд технических решений, лежащие в её основе.

**Ключевые слова:** антенны, вторичные радиолокационные системы, подавление боковых лепестков, ПБЛ.

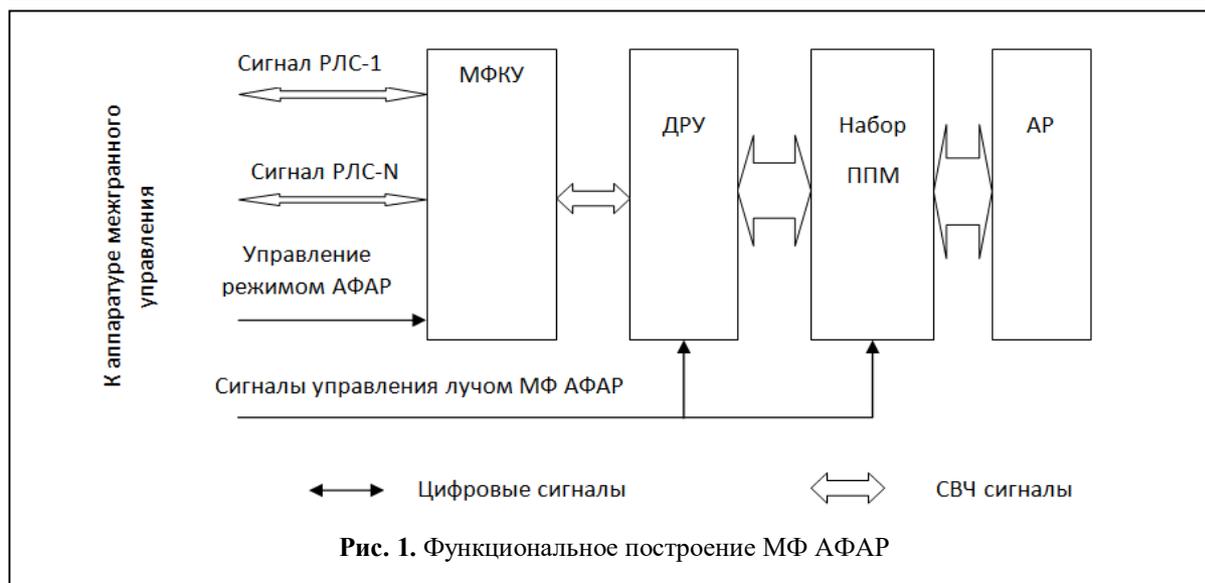
Одной из особенностей современных радиолокационных станций (РЛС) с суммарно-разностной обработкой сигнала, а также вторичных обзорных радиолокационных станций (ВОРЛ или SSR), радиолокационных систем государственного опознавания (СГО или IFF), РЛС с системами пространственной компенсации помех, и пр., является совместная организация в пространстве направленных, разностных и (или) всенаправленных диаграмм направленности (пространственных каналов), с последующей 2-х (и более) канальной обработкой сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов [1, 2]. Можно выделить три способа построения антенной системы для таких станций [3, 4]:

- использование отдельных обособленных антенных устройств для каждого пространственного канала;
- использование антенного устройства (обычно на основе антенной решётки или фазированной антенной решётки) с диаграммообразующим устройством (ДОУ) на выходе которого формируются сигналы каналов;

- гибридные антенные системы, использующие как обособленные антенные устройства, так и антенные устройства с ДОУ.

По ряду технико-экономических причин и особенностей применения наибольшее распространение получили антенные системы на основе антенных решёток с механическим сканированием. Так в [5] описана антенная система ВОРЛС на базе решётки и ДОУ. На выходе ДОУ, содержащего диаграммообразующую матрицу, делители и гибридные кольца, формируются два пространственных канала (направленный и канал подавления боковых лепестков) в полосе частот 6%. Подобная система может быть использована для возбуждения элементов фазированной антенной решётки (ФАР) с фазовым управлением лучом. В случае активной ФАР (АФАР), где возбуждение приёмо-передающих модулей (ППМ) осуществляется равноамплитудно необходимы специализированные решения.

ДОУ АФАР предназначена для распределения электромагнитной энергии между ППМ. В ее функции также может входить формирова-



ние нескольких типов ДН, в том числе, с помощью управляющих элементов ППМ (аттенуаторы, фазовращатели). В частности, принципы формирования ДН пространственных каналов подавления боковых лепестков в ФАР и АФАР систем SSR и IFF приведён в [6, 7]. Однако построение распределительной системы для широкополосных антенных устройств с разностными диаграммами направленности (ДН) имеет дополнительные трудности, связанные со сложностью реализации распределения амплитуд и фаз.

Методы проектирования полосковых делителей мощности (в т.ч. широкополосных) АФАР рассмотрены в [8]. Однако, в случае суммо-разностного делителя полоса частот будет определяться техническими возможностями реализации разностного канала. Так в качестве такого элемента часто используются гибридные кольцевые мосты либо двойной волноводный тройник (т.н. «magic tee»), полоса рабочих частот которых не превышают 20%. В [9, с. 603] описывается устройство распределения и фазирования (УРФ) широкополосной АФАР L-диапазона. Для реализации канала ПБЛ производится инвертирование значений старших разрядов (180 град) у части фазовращателей. Т.о. диаграмма направленности (ДН) АФАР может быть изменена с суммарной на разностную. Однако данное построение ис-

ключает возможность реализации амплитудного суммарно-разностного метода пеленгации.

В данной статье описывается ДРУ для работы в составе широкополосной многофункциональной (МФ) АФАР с возможностью формирования ненаправленной и разностной ДН.

Рассмотрим следующее функциональное построение МФ антенного устройства на базе АФАР (рис. 1): многофункциональное комплексирующее устройство (МФКУ), осуществляющее распределение сигналов, широкополосное диаграммообразующее и распределительное устройство (ДРУ), набор приёмопередающих модулей (ППМ) и излучающее полотно на базе антенной решётки (АР). Управление режимом работы и лучом осуществляется от аппаратуры более высокого уровня.

Высокочастотные сигналы от приёмопередающих блоков нескольких радиолокационных станций ( $N$  — количество коммутируемых РЛС), через аппаратуру межгранного управления поступают на МФКУ, где коммутируются на различные выходы ДРУ. С выходов ДРУ через усилительные и преобразующие цепи ППМ сигналы поступают к излучателям АР. Причем рабочая полоса частот ДРУ, ППМ и АР должна соответствовать полосам рабочих частот коммутируемых станций. Структура

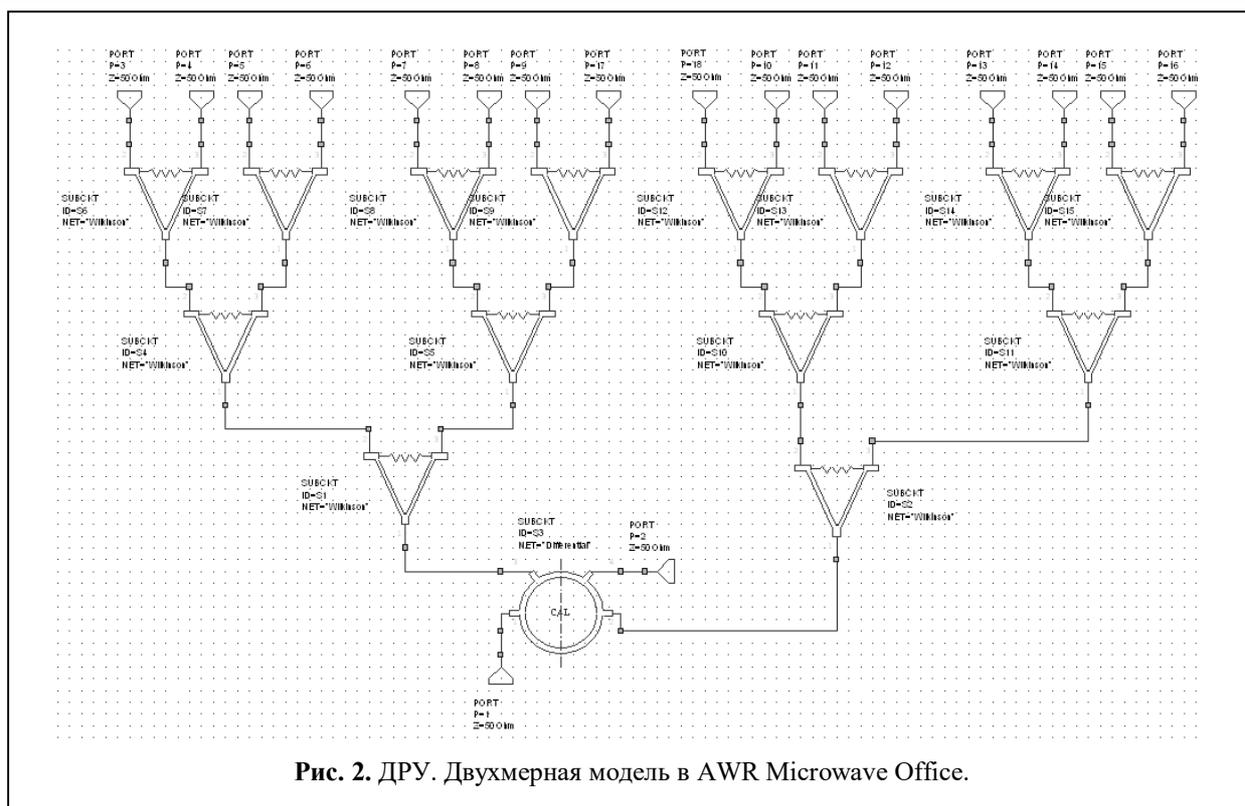


Рис. 2. ДРУ. Двухмерная модель в AWR Microwave Office.

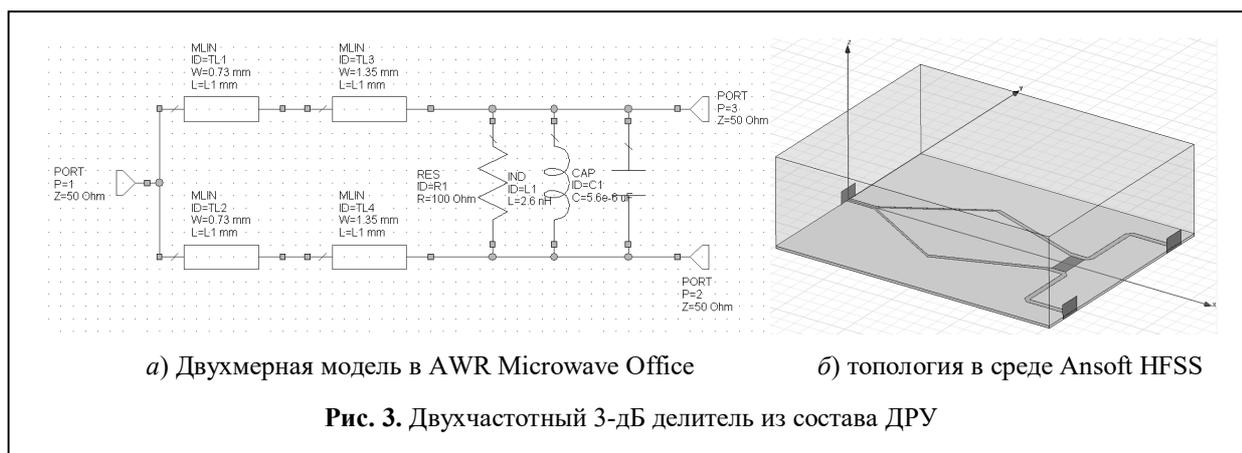
МФКУ будет зависеть от следующих факторов: количество станций  $N$  и их рабочий диапазон частот, количество диаграммообразующих выходов ДРУ, рабочий диапазона управляющих устройств ППМ, номенклатура типов формируемых ДН (направленные, ненаправленные, а также передающие, приёмные). Варианты построения МФКУ для  $N = 2$ , а также суммарным и разностным входом ДРУ рассмотрен в [10].

Существенным моментом при проектировании данной МФ АФАР является построение системы ДРУ оптимальной по критерию устойчивости АФР в широкой полосе частот. Для распределительных систем широкополосных АФАР очевидно использование схем с параллельным делением, отличительной особенностью которых является идентичная электрическая длина от входа до каждого из выходов. Для случая равномерном распределении амплитуд на выходах делителя, оптимальным делителем является т.н. многоплечный делитель, построенный по двоично-этажной схеме, у которых в качестве отдельных элементов ис-

пользуются балансные мостовые устройства с делением мощности на две равные части (3-децибельные делители), при синфазных сигналах на выходных плечах. Структура ДРУ представляющего собой 16-входный многоплечный делитель с суммарным и разностным входами приведена на рис. 2.

ДРУ содержит набор балансных мостовых устройств, соединённых между собой по схеме «бинарное дерево». Каждый элемент делителя, имеет в рабочей полосе большое переходное затухание между выходными плечами и близкое к единице КСВ любого из плеч. На входе устройства включен противофазный делитель на основе гибридного кольца. Как было показано, синтез ДРУ на основе данной схемы с использованием классических решений представляет собой сложную задачу, связанную с обеспечением широкополосности и фазовой стабильности делителей мощности и разностных цепей. Ниже описаны составляющие ДРУ, позволившие решить данную проблему.

Распространённым конструктивным решением построения бинарного делителя является

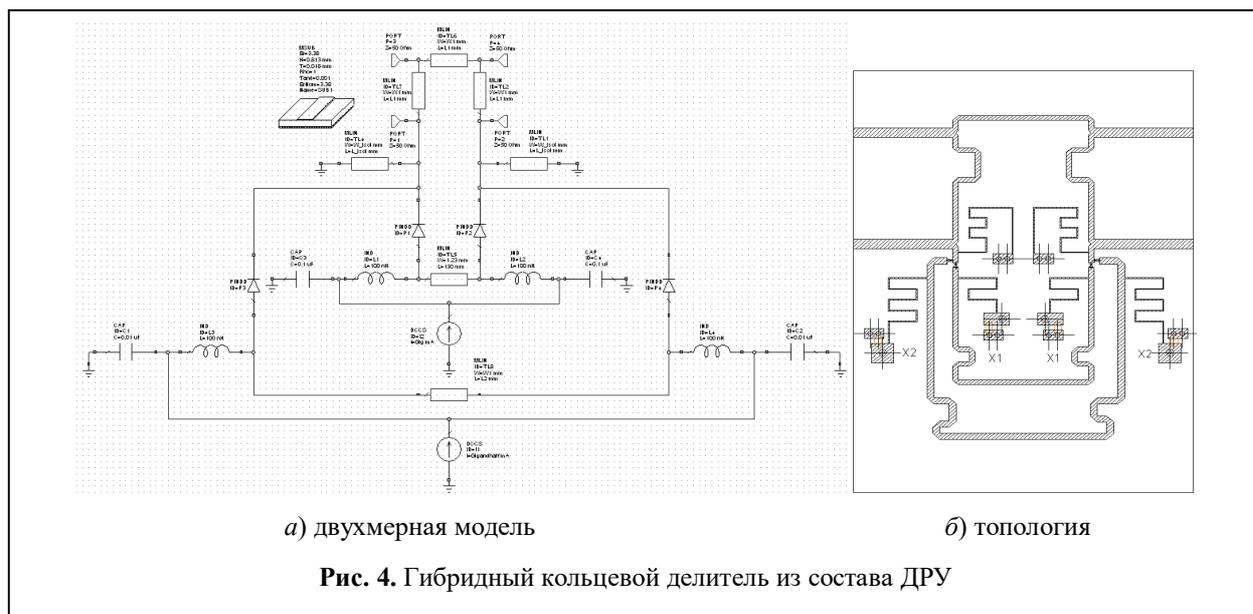


использование многоплечного делителя на основе резистивных делителей Вилкинсона (Wilkinson Power Divider), обладающих малыми размерами, низкими потерями и приемлемой развязкой по выходам в рабочей полосе частот. Дополнительным преимуществом такого решения для канализирующих систем ФАР является низкая чувствительность к рассогласованию системы делитель–излучатели, т.к. большая часть отражённой волны поглощается на балластных резисторах, что положительно сказывается на форме ДН. Однако, классический делитель Вилкинсона [11] обладает ключевым недостатком — низкой широкополосностью, которая составляет всего лишь около 10–20% относительно центральной частоты. Для того чтобы решить эту проблему можно использовать техническое решение, описанное в [12]. Это делитель, работающий на двух произвольных частотах, представляющий собой доработанный классический делитель Вилкинсона, в котором четвертьволновый участок заменён двумя последовательными линиями передачи с различными волновыми сопротивлениями, а выходные порты шунтированы параллельно включенными резистором  $R_1$ , индуктивностью  $L_1$  и конденсатором  $C_1$  (рис. 3).

Дополнительная сложность в реализации широкополосного суммарно-разностного делителя заключается в том, что необходимо обеспечить стабильную разницу фаз в  $180^\circ$  на выходах в широком диапазоне частот. Следует также акцентировать внимание на стабильно-

сти развязки между входами, выходами устройства и амплитудную стабильность выходного сигнала по частоте. Подобное устройство может быть получено различными методами.

Самое широкое распространение получили гибридные кольцевые делители. Они просты в изготовлении, однако их работоспособность напрямую зависит от участка  $3/4\lambda$ , что обуславливает их низкую широкополосность. Существуют различные решения этой проблемы, которые были описаны, к примеру, в работах [13, 14]. Основная идея заключается в том, чтобы заменить чувствительную к изменению частоты секцию (длиной  $3/4\lambda$ ) фазовращателем, изменяющим фазу в этом плече на  $180^\circ$ . Одним из наиболее очевидных решений для этого может служить фазоопрокидывающее устройство на связанных линиях [15]. Однако, несложно показать, что фазовращатель на связанных линиях для данной частоты технически реализовать физически практически невозможно из-за того, что ширина зазора между линиями должна будет составлять всего несколько микрон. Для решения этой проблемы, в ряде работ [16, 17] было предложено использовать связанные линии, находящиеся на обеих сторонах вертикально установленной диэлектрической пластины с диэлектрической проницаемостью, отличающейся от диэлектрической проницаемости основной подложки. Технологически, подобное решение является до-



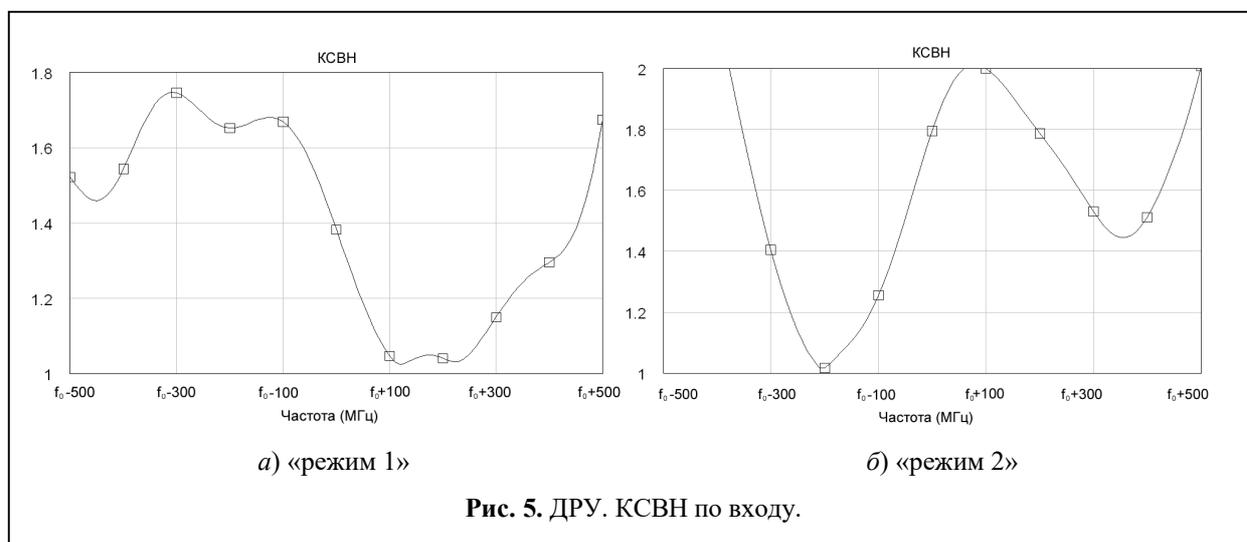
статочным сложным и не обеспечивает необходимой широкополосности.

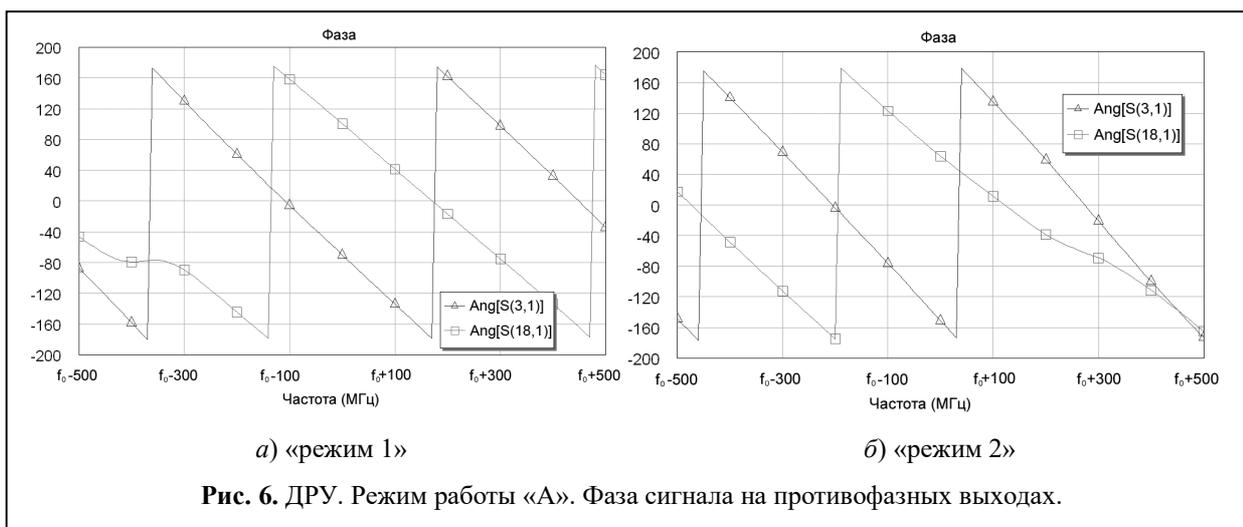
На рис. 4 изображен гибридный кольцевой делитель мощности с электрически переключаемой секцией длиной  $3/4\lambda$ . Данный делитель работает в двух режимах (т.н. «режим 1» и «режим 2»), оптимальных для частот  $f_1$  и  $f_2$  соответственно. Переключение между режимами осуществляется подачей управляемых напряжений на р-и-п диоды.

Совместное использование гибридного кольцевого делителя и двухчастотного делителя Вилкинсона позволяет построить широкополосный эффективный суммарно-разностный многоплечный делитель. В этом случае струк-

турная схема устройства аналогична изображенной на рис. 2 и также основывается на двоично-этажной схеме. Некоторые результаты моделирования и комплексной параметрической оптимизации суммарно-разностного делителя в среде AWR Microwave Office представлены на рис. 5, рис. 6.

Из приведенных графиков видно, что при переключении режимов работы стабилизируются уровни согласования и фазовые соотношения в следующих областях расположения частот  $f_1$  и  $f_2$ , причём  $f_1 = f_0 + 200$  МГц (режим 1) и  $f_2 = f_0 - 200$  МГц (режим 2). Другие результаты моделирования сведены в таблицу 1.





Описанное ДРУ совместно с МФКУ и управляющими элементами из состава ППМ позволяет формировать управляемые направленные, ненаправленные и разностные ДН в широкой полосе частот. Управления режимом работы ДРУ может осуществляться от общей системы управления для нескольких МФ АФАР.

**Литература**

1. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. Руководство по вторичным обзорным радиолокационным (ВОРЛ) системам. Изд. 3-е. / Международная организация гражданской авиации, 2004. 257 с.
3. Алиев М.Ю., Самбуров Н.В., Ларин А.А. Антенные системы запросчиков вторичных радиолокационных комплексов и систем. Принципы организации и использования пространственных каналов информации // Радиопромышленность. 2014. Вып. 4. С. 116–137.
4. Самбуров Н.В., Мазин А.В. Антенные системы запросчиков вторичных радиолокационных

комплексов и систем. Системы на основе рефлекторных антенн и антенных решеток // Радиопромышленность. 2014. Вып. 4. С. 97–115.

5. Blefko M. J., Klimczak W.N. A secondary surveillance radar (SSR) antenna with integrated difference and sidelobe suppression (SLS) channel // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest, Baltimore, MD, USA. 1996. Vol. 2. Pp. 1146–1149. DOI: 10.1109/APS.1996.549799.
6. Liansheng Y. Transmit antenna pattern synthesis for secondary surveillance radar // Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology. Dana Point, CA, USA, 2000. Pp. 327–330. DOI: 10.1109/PAST.2000.858967.
7. Appelbaum A., Kaplan L. Sidelobe suppression considerations in the design of an electronically steered IFF antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1976. Vol. 24. No. 4. Pp. 425–432. DOI: 10.1109/TAP.1976.1141366.
8. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учебное пособие для вузов / Под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2003. 632 с.
9. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2020-2012 / Под ред. Ю.И. Белого. М.: Радиотехника, 2011. 920 с.
10. Ганичев А.А., Самбуров Н.В. Многофункциональное комплексированное устройство коммутации сигналов L-диапазона // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. №10. С. 33–37.

**Таблица 1.**

	«Режим 1»	«Режим 2»
Диапазон частот	$f_1 \pm 100$ МГц	$f_2 \pm 100$ МГц
Величина КСВН	не более 1,2	не более 1,4
Разность фаз на синфазных выходах	до 10 градусов	
Разность фаз на противофазных выходах	170...190 градусов	

11. Wilkinson E.J. An N-way Hybrid Power Divider // IRE transactions on microwave theory and techniques 1960. Vol. 8. Iss. 1. Pp. 116–118.
12. Wu L., Sun Z., Yilmaz H., Berroth M. A dual-frequency wilkinson power divider // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 54. No. 1. Pp. 278–284.
13. Kao C.-W., Chen C.H. Novel Uniplanar 180° hybrid-ring Couplers with Spiral-type Phase Inverters

// IEEE Microwave and guided wave letters. 2000. Vol.10. Pp. 412–414.

14. *Renmark S.* Wide-Band Balanced Line Microwave Hybrids // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1977. Vol. 25. Iss. 10. Pp. 825–830.

15. *March S.* A Wideband Stripline Hybrid Ring // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1968. Vol. 16. Iss. 6. Pp. 361.

16. *Konishi Y., Awai I., Fukuoka Y., Nakajima M.*

A Directional Coupler of a Vertically Installed planar Circuit Structure // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1988. Vol. 36. Iss. 6. Pp. 1057–1063.

17. *Chi C.-H., Chang C.-Y.* A New Class of Wideband Multisection 180° Hybrid Rings Using Vertically Installed Planar Couplers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006. Vol. 54. Iss. 6. Pp. 2478–2486.

Поступила 19 декабря 2023 г.

English

## BEAM-FORMING DEVICE FOR BROADBAND APAA

**Nikolay Viktorovich Samburov** — the Head of Department, JSC TYPHOON

E-mail: [samburov.n.v@yandex.ru](mailto:samburov.n.v@yandex.ru)

**Mikhail Vladimirovich Trebin** — Lead Engineer, JSC TYPHOON

E-mail: [mtrebin@gmail.com](mailto:mtrebin@gmail.com)

Address: 600000, Russian Federation, Kaluga, Grabtsevskoe Ave., 174.

*Abstract:* The joint spatial arrangement of directional, difference and (or) omni directional patterns (DP) followed by 2 (or more) channel processing of microwave frequency (MF) signals is one of the specific features of today's radars with sum-and-difference signal processing, as well as of second-surveillance radars, IFF (Identification Friend Or Foe) radars, radars with spatial interference control systems, etc.. Using unified antenna assembly by radars for various purposes and operating ranges requires to ensure timely switching among radars and forming a DP series for detection and suppression. Therefore, the widespread mechanically scanned antenna systems do not meet this requirement. Technical capability of multifunctional use of APAA (Active Phased Antenna Array) is determined by special construction of the radar facility. An essential point in engineering this multifunctional APAA is BDD (beam-forming distribution device) architecture arrangement, which is optimal with respect to stability of the broadband amplitude-phase distribution. Parallel division circuits are obvious to use for broadband APAA distribution systems, the distinctive feature of which is identical electrical length from the input to each of the outputs. A common design solution to construct a binary divider is to use a multi-section divider based on Wilkinson resistive microwave dividers having a small size, low loss and acceptable isolation of outputs in the operating bandwidth. Hybrid ring dividers came into wide use for constructing difference channels. The above technical solutions lack the required broadband feature. The modified Wilkinson resistive divider and hybrid ring power divider with an electrically switchable  $3/4\lambda$  long section was chosen for use as a basis. As a result of the device simulation there was revealed the stability of the phase distribution for sum and difference DP types at least 10 degrees relative to the assigned distributions. The described BDD enables to form steerable directional, non-directional and difference DP types in a broadband. BDD operation control mode can be done through a common control system for several multifunctional APAA.

*Keywords:* antennas, secondary radars, side lobe suppression, SLS.

### References

1. Radio-electronic systems: Fundamentals of construction and theory. Directory. Ed. 2nd, revised and additional. Ed. by *Ya.D. Shirman*. Moscow: Radiotekhnika, 2007. 512 p.
2. Manual on secondary surveillance radar (SSR) systems. Ed. 3rd. International Civil Aviation Organization, 2004. 257 p.
3. *Aliiev M.Yu., Samburov N.V., Larin A.A.* Antenna systems of interrogators of secondary radar complexes and systems. Principles of organization and use of spatial information channels. Radiopromyshlennost'. 2014. Vol. 4 (4). Pp. 116–137.
4. *Samburov N.V., Mazin A.V.* Antenna systems of interrogators of secondary radar complexes and systems. Systems based on reflector antennas and antenna arrays. Radiopromyshlennost'. 2014. Vol. 4. Pp. 97–115.
5. *Blefko M. J., Klimczak W.N.* A secondary surveillance radar (SSR) antenna with integrated difference and sidelobe suppression (SLS) channel. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest,

Baltimore, MD, USA. 1996. Vol. 2. Pp. 1146–1149. DOI: 10.1109/APS.1996.549799.

6. *Liansheng Y.* Transmit antenna pattern synthesis for secondary surveillance radar. Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology. Dana Point, CA, USA, 2000. Pp. 327–330. DOI: 10.1109/PAST.2000.858967.

7. *Appelbaum A., Kaplan L.* Sidelobe suppression considerations in the design of an electronically steered IFF antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1976. Vol. 24. No. 4. Pp. 425–432. DOI: 10.1109/TAP.1976.1141366.

8. Microwave devices and antennas. Design of phased array antennas: Textbook for universities. Ed. *D.I. Voskresensky*. Moscow: Radiotekhnika, 2003. 632 p.

9. Radar systems for special and civil purposes. 2020-2012. Ed. *Yu.I. Belyj*. Moscow: Radiotekhnika, 2011. 920 p.

10. *Ganichev A.A., Samburov N.V.* Multifunctional integrated device for switching L-band signals. Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy. 2014. No. 10 (Vol. 19). Pp. 33–37.

11. *Wilkinson E.J.* An N-way Hybrid Power Divider. IRE transactions on microwave theory and techniques 1960. Vol. 8. Iss. 1. Pp. 116–118.

12. *Wu L., Sun Z., Yilmaz H., Berroth M.* A dual-frequency wilkinson power divider. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 54. No. 1. Pp. 278–284.

13. *Kao C.-W., Chen C.H.* Novel Uniplanar 180° hybrid-ring Couplers with Spiral-type Phase Inverters. IEEE Microwave and guided wave letters. 2000. Vol.10. Pp. 412–414.

14. *Renmark S.* Wide-Band Balanced Line Microwave Hybrids. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1977. Vol. 25. Iss. 10. Pp. 825–830.

15. *March S.* A Wideband Stripline Hybrid Ring. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1968. Vol. 16. Iss. 6. Pp. 361.

16. *Konishi Y., Awai I., Fukuoka Y., Nakajima M.* A Directional Coupler of a Vertically Installed planar Circuit Structure. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1988. Vol. 36. Iss. 6. Pp. 1057–1063.

17. *Chi C.-H., Chang C.-Y.* A New Class of Wideband Multisection 180° Hybrid Rings Using Vertically Installed Planar Couplers. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006. Vol. 54. Iss. 6. Pp. 2478–2486.