

**Кочубей Алексей Сергеевич** – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89896270939; магистр, инженер-конструктор 2 категории.

**Zikiy Anatoliy Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

**Kochubey Alexey Sergeevich** – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79896270939; Master, design engineer of the 2nd category.

УДК 621.396.677.49

DOI 10.18522/2311-3103-2021-2-91-104

**А.О. Касьянов**

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ АНТЕННЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

*Статья посвящена анализу результатов численного исследования характеристик рассеяния печатного пространственного и частотно-избирательного антенного обтекателя на основе электродинамического моделирования частотно-избирательных поверхностей с диэлектрическими укрытиями. Задачи моделирования решены методом интегрального уравнения. С помощью разработанной математической модели выполнено всестороннее численное исследование микроволновых устройств пространственной, частотной и поляризационной трансформации и селекции, выполненных в виде многоэлементных мультипланарных печатных отражательных антенных решеток. На основе проведенных исследований найдены конструктивные решения для частотно-селективных структур в интегральном исполнении, реализующих функции пространственных и частотных фильтров. Рассмотрены вопросы конструктивного синтеза многослойных планарных частотно-избирательных поверхностей для создания пространственных и частотных фильтров, интегрируемых в излучающие и распределительные системы современных многоэлементных антенных решеток в печатном исполнении. Получены численные результаты электродинамического моделирования частотно-избирательных поверхностей и угловых фильтров с диэлектрическими укрытиями, которые могут быть использованы для выбора наиболее рациональных вариантов топологий частотно-избирательных поверхностей и угловых фильтров при разработке многофункциональных обтекателей в антенных системах микроволнового диапазона. На основе полученных численных данных рассматриваются возможности применения трех вариантов плоских дифракционных решеток в качестве частотных фильтров и два варианта решеток в качестве пространственных фильтров в составе антенных обтекателей. Предложенные в работе пространственные частотные фильтры в виде мультипланарных печатных решеток, входящих в состав антенных обтекателей, предназначены для обеспечения электромагнитной совместимости близкорасположенных радиоэлектронных средств, функционирующих в смежных частотных диапазонах, и содержащих сканирующие антенные решетки, устанавливаемые под антенными обтекателями. В то же время установка в антенных обтекателях, предложенных в работе угловых фильтров, выполненных в виде многослойных печатных дифракционных решеток проходного типа, позволяет устранить появление нежелательных побочных главных максимумов в диаграммах направленности разреженных цифровых антенных решеток перспективных радиотехнических комплексов микроволнового диапазона длин волн.*

*Частотно-избирательная поверхность; угловой фильтр; многофункциональный антенный обтекатель; метод интегрального уравнения; многослойные диэлектрические укрытия; поляризационная матрица рассеяния.*

A.O. Kasyanov

## RESULTS OF NUMERICAL STUDY OF SCATTERING CHARACTERISTICS IN ANTENNA RADOMES BASED ON METAL-DIELECTRIC GRATINGS

*Mathematical model of multilayered printed frequency selective surfaces with dielectric covers is presented in this paper. The model is built on the suggestion of array infinity and perfect conductivity of microstrip elements. Such printed structures can be used as frequency selective surface and as covers with controllable characteristics (for example tunable filters, adaptive radar cover, electronically switched polarizers). Full-wave analysis is executed by the integral equation method of electromagnetics. The numerical solution of an integral equation has been obtained by Galerkin's method. Unknown distribution of surface magnetic currents has been approximated by roof-top basic functions. The generalized scattering matrix method was used for simulation of multilayered printed frequency selective surface. The paper presents the compound algorithm which combines the integral equation method with the method of generalized scattering matrix. A lot of numerical examples are presented proving the algorithm effectiveness. By means of this model there were synthesized multilayer frequency selective surface as periodic arrays of the printed elements, which have arbitrary shape of reradiators. It is known, that the printed elements of special shape ensure, as rejecting and as transacting of electromagnetic waves in the given frequencies, and have neglected angular sensitivity. The results of constructive synthesis of printed frequency selective surfaces as rejecting or transmitting filters, which have neglected angular sensitivity, are represented in paper. Such an algorithm is rather flexible and multiple repeats the basic problem solution. It makes the procedure of computer code preparing much more effective and do not require to change the problem decision itself.*

*Frequency selective surfaces; angular filters; multifunctional antenna's radomes; integral equation method; multilayer magnetodielectric covers; radar scattering matrix.*

**Введение.** Антенны радиотехнических систем современных надводных и подводных судов, а также летательных аппаратов в процессе эксплуатации подвергаются самым разнообразным воздействиям окружающей среды, которые могут значительно ухудшить их характеристики. Для защиты антенн от воздействия окружающей среды используются диэлектрические оболочки – радиопрозрачные антенные обтекатели, которые должны вносить минимальные искажения в излучаемое поле [1]. Это означает, что задача создания современных радиотехнических комплексов требует постоянного совершенствования техники радиопрозрачных обтекателей.

Перспективными направлениями разработки радиопрозрачных обтекателей являются широкополосные обтекатели на основе многослойных структур. Введение дифракционных решеток в состав таких многослойных антенных обтекателей позволяет, наряду с обеспечением герметичности, решать с помощью обтекателей также и задачи пространственной, частотной и поляризационной селекции [2].

Вопросы разработки поляризационно-селективных антенных обтекателей ранее рассмотрены автором на примере антенн судовых радионавигационных станций [3-9]. В настоящей работе рассмотрим возможности применения и характеристики рассеяния металлодиэлектрических антенных обтекателей с расширенными функциями в части пространственной и частотной селекции.

Целью данной работы является разработка антенных обтекателей в виде армированных диэлектриком многослойных периодических решеток металлических пластин или отверстий в перфорированных экранах, выполняющих функции устройств пространственной и частотной селекции, а также определения возможности их использования в составе перспективных радиосистем.

**2. Частотно-избирательные антенные обтекатели.** Обзор современного состояния исследований и разработок в области частотно-избирательных поверхностей, представляющих собой решетки металлических пластин или апертур в про-

водящем экране, приведен автором в монографии [10], где показано, что при решении задач электродинамического моделирования многослойных обтекателей в большинстве работ [1, 11] используется подход, в основу которого положена замена слоистой металлодиэлектрической структуры обтекателя каскадным соединением эквивалентных линий передачи с включенными в них сосредоточенными элементами. В то же время, автор в работах [3, 12] при разработке многослойных обтекателей судовых антенн с улучшенными характеристиками опирался на модели электродинамического уровня, при построении которых использовался метод обобщенной матрицы рассеяния.

Результаты численного исследования характеристик рассеяния плоских частотно-избирательных антенных обтекателей в виде металлодиэлектрических дифракционных решеток, полученные с помощью вычислительных программ, разработанных автором на основе метода интегральных уравнений, рассмотрены в статье [12], где показано, что с помощью таких решеток удастся решить актуальную задачу разработки наиболее технологичных антенных обтекателей для развязки близкорасположенных антенн, работающих в смежных частотных диапазонах.

**2.1. Постановка задачи конструктивного синтеза частотно-избирательного антенного обтекателя.** Пусть имеется два радиоэлектронных средства (РЭС), в состав которых входят приемо-передающие антенные системы. Первое РЭС работает в двух узких диапазонах частот: в окрестности частоты  $f_0$  – 1-й поддиапазон ( $\Delta f_1$ ), и в окрестности частоты  $1,17f_0$  – 2-й поддиапазон ( $\Delta f_2$ ). Второе РЭС – в диапазоне частот от  $0,87f_0$  до  $0,93f_0$  – поддиапазон заграждаемых частот ( $\Delta f_3$ ). В первом РЭС требуется обеспечить уровень пространственной развязки его приемной антенны от мешающего излучения, возбуждаемого передающей антенной второго РЭС, не менее чем на 23 дБ. При этом потери на прохождение волн сквозь антенный обтекатель на частотах первого РЭС не должны превышать 0,5 дБ.

**2.2. Результаты численного исследования характеристик рассеяния металлодиэлектрических антенных обтекателей.** В работах автора [12, 13] предложено два варианта возможной конструктивной реализации частотно-избирательного металлодиэлектрического антенного обтекателя. При разработке каждого из этих вариантов учитывалось требование по обеспечению частотной развязки близкорасположенных антенных систем приемо-передающих РЭС, работающих в смежных частотных диапазонах.

Несмотря на то, что описанные в [12, 13] конструкции антенных обтекателей полностью удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям в части частотной избирательности, присутствие диэлектрических материалов в их составе снижает эксплуатационные характеристики таких обтекателей.

Отмеченный недостаток преодолевается в антенных обтекателях, выполненных на основе частотно-избирательных поверхностей (ЧИП) волноводного типа [14–19].

Ниже в качестве примера приводятся результаты численного исследования характеристик рассеяния, в качестве которых выступают элементы матрицы рассеяния [S], ЧИП волноводного типа, выполненной в виде плоской металлической дифракционной решетки.

Для целей пространственной развязки удобно использовать дифракционную решетку из отрезков квазиквадратных волноводов с резонансными диафрагмами. Схематическое изображение фрагмента такой ЧИП показано на рис. 1. Топология её единичной ячейки изображена на рис. 2.

Как показано на рис. 1, волноводные элементы решетки 2 размещены в узлах сетки с треугольной ячейкой. При этом ячейка Флоке решетки 1 имеет размеры:  $A \times B = (0,6343 \times 0,5493) \cdot \lambda_0$ , где  $\lambda_0 = c / f_0$  – длина волны,  $c$  – скорость света в вакууме. Размеры апертуры 3 прямоугольного волновода:  $a \times b = (0,5198 \times 0,5188) \cdot \lambda_0$ . Размеры апертур каждой из резонансных диафрагм:  $w \times h = (0,4312 \times 0,4433) \cdot \lambda_0$ .

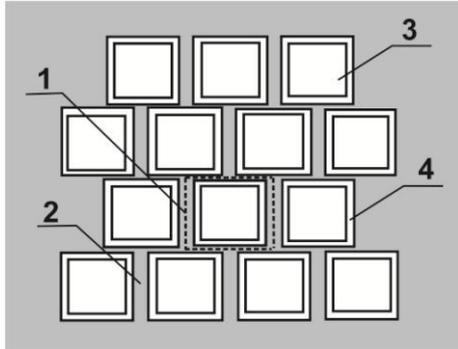


Рис. 1. Изображение фрагмента ЧИП волноводного типа в плановой проекции: 1 – канал Флоке; 2 – волноводный фланец; 3 – апертура прямоугольного волновода; 4 – резонансная диафрагма

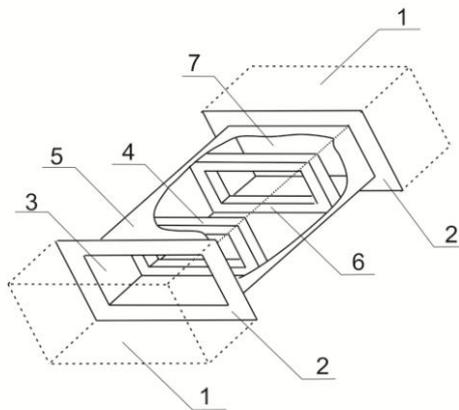


Рис. 2. Топология единичной ячейки ЧИП волноводного типа: 1 – канал Флоке; 2 – волноводный фланец; 3 – входная апертура отрезка волновода; 4 – входная резонансная диафрагма; 5 – отрезок волновода; 6 – входная резонансная диафрагма; 7 – выходная апертура отрезка волновода

Как показано на рис. 2, расстояние от апертуры отрезка прямоугольного волновода 5 до ближайшей резонансной диафрагмы:  $t_1 = 1,1029 \cdot \lambda_0$ . Расстояние между диафрагмами 4, расположенными в отрезке прямоугольного волновода:  $t_2 = 1,0287 \cdot \lambda_0$ . Толщина резонансной диафрагмы:  $s = 0,0572 \cdot \lambda_0$ .

На рис. 3 и 4 показаны, рассчитанные на частоте  $f_0$ , распределения  $y$  – составляющей вектора напряженности электрического поля в двух поперечных и одной продольной плоскости единичной ячейки ЧИП волноводного типа, изображенной на рис. 2. При этом поперечные координаты  $x$  или  $y$  обозначены на рис. 3 буквой  $\xi$ , а продольная координата  $z$  – буквой  $\zeta$  на рис. 4.

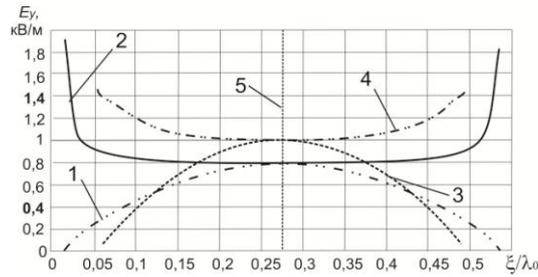


Рис. 3. Распределения  $y$ -составляющей вектора напряженности электрического поля в поперечной плоскости: 1 – в среднем сечении входной апертуры отрезка волновода для случая  $\xi = x$ ; 2 – в той же апертуре, но при  $\xi = y$ ; 3 – в среднем сечении ближайшей диафрагмы для случая  $\xi = x$ ; 4 – в той же диафрагме, но при  $\xi = y$ ; 5 – координата среднего сечения апертуры волновода / диафрагмы

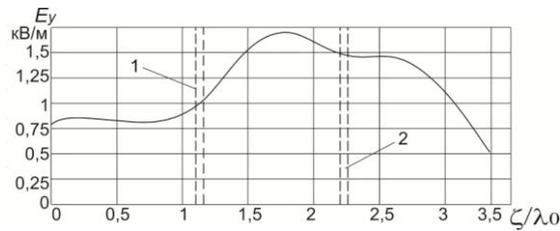


Рис. 4. Распределения  $y$ -составляющей вектора напряженности электрического поля в продольном сечении, проходящем через ось волновода: 1 – входная резонансная диафрагма; 2 – выходная диафрагма

Как видно из графиков, показанных на рис. 3, распределения поля в прямоугольных апертурах являются седловидными. При этом, как следует из рис. 4, уровень поля во входной диафрагме 4 примерно на четверть превышает уровень поля во входной апертуре 3 отрезка волновода, уровень поля в выходной диафрагме 6 примерно в полтора раза превышает уровень поля во входной диафрагме 4, а уровень поля в выходной апертуре 7 отрезка волновода 5 примерно в три раза ниже уровня поля в выходной диафрагме 6.

Частотные характеристики (ЧХ) диагональных элементов  $S_{pq}$ ,  $p = q$  поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) [S] вышеописанной ЧИП показаны на рис. 5.

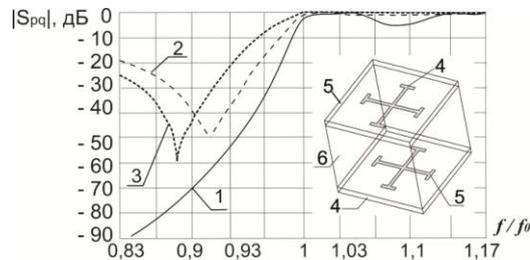


Рис. 5. Частотные характеристики элементов поляризационной матрицы рассеяния [S] ЧИП: 1 – ЧИП волноводного типа (рис. 1, 2); 2 – печатная решетка, изображенная во врезке рис. 5; 3 – печатная решетка, изображенная на рис. 6; 4 – печатные вибраторы; 5 – диэлектрические укрытия; 6 – сердцевина

Для сравнения на рис. 5 приведены ЧХ элементов ПМР печатных решеток, рассмотренных в работах автора [12, 13]. Излучатели обеих печатных решеток представляют собой планарные вибраторы, выполненные в виде иерусалимских крестов, нанесенных с обеих сторон на диэлектрическую подложку (сердцевину) и имеющих двухсторонние диэлектрические укрытия. Для решетки, топология которой изображена на врезке в рис. 5, сердцевина представляет собой четвертьволновый слой ( $\lambda_0/4$ ), выполненный из однородного материала (Teflon 2,08). Для решетки, топология которой изображена на рис. 6, сердцевина является составной, выполненной в виде многослойной воздушно-диэлектрической структуры, эквивалентной однородному слою толщиной  $\lambda_0/4$ .

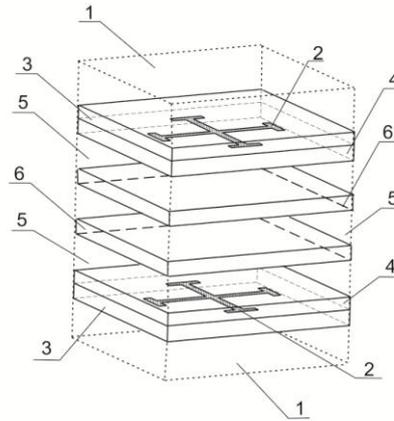


Рис. 6. Топология единичной ячейки металлдиэлектрической ЧИП: 1 – канал Флоке; 2 – печатные вибраторы; 3 – диэлектрическое укрытие; 4 – внешние слои диэлектрической сердцевины; 5 – воздушные прослойки сердцевины; 6 – внутренние слои диэлектрической сердцевины

Как видно из графиков, решетка волноводного типа по частотной избирательности значительно превосходит печатные, однако в случае её исполнения в цельнометаллическом варианте масса такой ЧИП оказывается существенно выше, чем у печатных ЧИП. Для преодоления указанного недостатка при изготовлении вышеописанной ЧИП волноводного типа потребуется применение технологии металлизации пластиков.

**3. Угловые фильтры.** Исследуем возможность применения многослойных мультирешеточных ЧИП в качестве устройств пространственной селекции на частоте  $f_0$ . Такие устройства называют *угловыми фильтрами* (УФ) [20–25]. Областью применения УФ являются сканирующие антенные решетки (АР) [26]. С помощью УФ удастся устранить побочные главные максимумы в ДН антенных решеток с повышенными межэлементными расстояниями. Таким образом, применение УФ способствует уменьшению числа излучателей в АР, что ведет к снижению их стоимости.

Например, УФ можно включить в состав многофункционального обтекателя судовой антенны [4], где для устранения паразитной составляющей вектора поляризации поля возбуждаемого волноводно-щелевой антенной решеткой (ВЩАР) из встречно-наклонных щелей, выполненных в узкой стенке волновода, используется поляризационный фильтр. Другим способом устранения нежелательной вертикальной составляющей поля ВЩАР является выполнение поперечных щелей на широкой стенке волновода. Однако такой излучатель имеет повышенные межэле-

ментные расстояния. При этом возрастает опасность появления побочных главных максимумов (ПГМ) в диаграмме направленности (ДН) антенны. Задачу подавления этих лепестков можно возложить на многофункциональный обтекатель. Как и в случае, когда обтекатель выполняет функции поляризационного фильтра [3–9], УФ представляет собой плоскую герметизирующую вставку, устанавливаемую в раскрытие рупора. Однако теперь эта вставка, помимо функций обтекателя, должна выполнять роль пространственного, или углового фильтра [4].

В качестве одного из вариантов конструктивной реализации такого фильтра рассмотрим типичную частотно-селективную структуру, а именно, перфорированный металлический экран. Интерес к исследованию ЧИП в качестве углового фильтра не является случайным. Дело в том, что, как отмечается в [27, 28], с одной стороны, при фиксированном угле падения поведение характеристик рассеяния углового фильтра в полосе частот ничем не отличается от аналогичных зависимостей обычной ЧИП, а, с другой стороны, при фиксированной частоте ЧИП ведет себя в секторе углов падения подобно угловому фильтру.

**3.1. Постановка задачи конструктивного синтеза пространственно-избирательного антенного обтекателя.** Пусть имеется мобильное РЭС, устанавливаемое на подвижном носителе. В состав данного РЭС должна входить остронаправленная антенная система (АС), предназначенная для излучения и приема электромагнитных волн в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн на двух наклонных взаимно ортогональных линейных поляризациях. Необходимость установки РЭС на подвижном носителе исключает возможность применения крупногабаритной параболической антенны в качестве остронаправленной АС данного РЭС.

Как известно [26], помимо применения параболических антенн, для создания остронаправленного излучения могут быть использованы плоские антенные решетки. Например, рассмотрим возможность использования многоэлементной плоской решетки рупорных излучателей в качестве АС вышеописанного мобильного РЭС. На рис. 7 показан фрагмент такой плоской антенной решетки (АР) размером  $5 \times 3$  излучателей. Как видно из рис. 7, в качестве излучателей в такой АР выступают пирамидальные рупорные антенны.

Для обеспечения требования одновременной работы на прием и передачу на двух наклонных взаимно ортогональных линейных поляризациях каждый из рупорных излучателей такой решетки должен быть двухполяризационным, как показано на рис. 8. Как видно из рис. 8, объединение/деление волн двух ортогональных поляризаций в фидерной системе каждого пирамидального рупора 1 реализуется на отрезке квадратного двухмодового волновода 2.

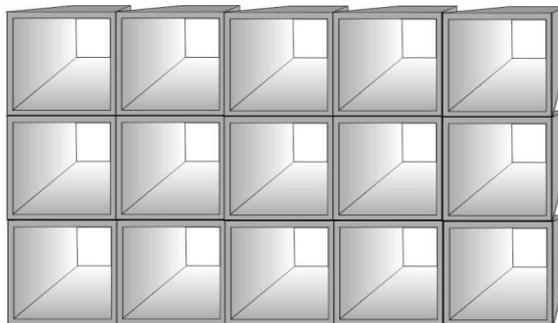


Рис. 7. Фрагмент плоской антенной решетки, составленной из рупорных излучателей

Для обеспечения высокого КПД каждый из прямоугольных волноводов 3 и 4, возбуждающих двухмодовый волновод 2, должен быть одномодовым и работать на основном типе волны.

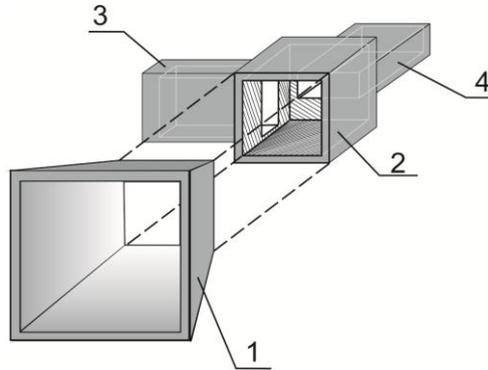


Рис. 8. Излучатель плоской двухполяризационной решетки рупорных антенн: 1 – пирамидальный рупор; 2 – отрезок квадратного волновода; 3 – отрезок прямоугольного волновода, предназначенный для возбуждения волны горизонтальной поляризации; 4 – отрезок прямоугольного волновода, предназначенный для возбуждения волны вертикальной поляризации

Всем вышеперечисленным требованиям удовлетворяет АС, имеющая следующие характеристики: апертура – прямоугольная с размерами  $24 \times 6$  элементов, расположенных в узлах сетки с квадратной ячейкой; шаги решетки  $A = B \approx 1,37 \cdot \lambda_0$ , размеры апертуры рупора  $a = b \approx 1,29 \cdot \lambda_0$ , размеры горловины рупора  $a_1 = b_1 \approx 0,744 \cdot \lambda_0$ , длина раствора рупора  $L \approx \lambda_0$ , размеры апертуры отрезка квадратного волновода  $a_2 = b_2 \approx 0,6659 \cdot \lambda_0$ .

Сечения ДН описанной выше антенны азимутальной и угломестной плоскостями, рассчитанные на частоте  $f_0$ , показаны соответственно на рис. 9 и рис. 10.

Как видно из графиков, показанных на рис. 9 и 10, в обеих плоскостях в ДН антенны присутствуют побочные главные максимумы при углах примерно равных  $45^\circ$  и  $135^\circ$ . Появление ПГМ в ДН антенны обусловлено тем, что данная АР является разреженной, поскольку шаги решетки в обеих плоскостях превышают рабочую длину волны  $\lambda_0$ . Для устранения ПГМ в ДН антенны её обтекатель может быть выполнен в виде УФ.

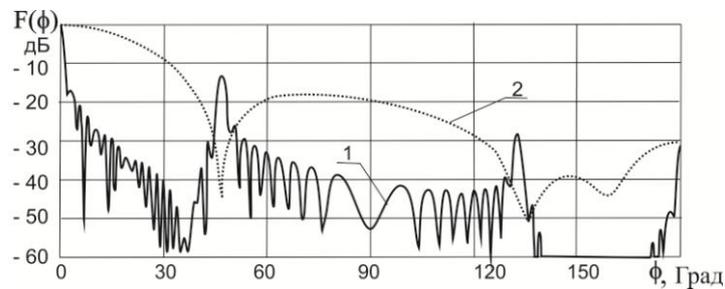


Рис. 9. Диаграмма направленности антенны в азимутальной плоскости: 1 – АР без углового фильтра; 2 – излучатель АР с угловым фильтром

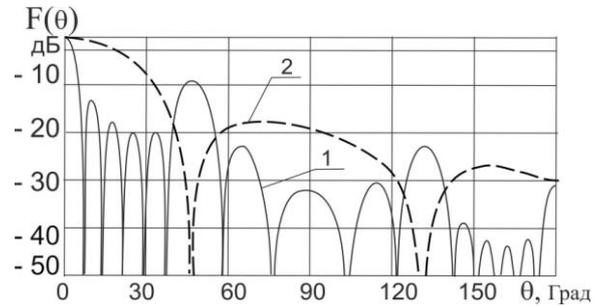


Рис. 10. Диаграмма направленности антенны в угломестной плоскости:  
1 – AP без углового фильтра; 2 – излучатель AP с угловым фильтром

**3.2. Результаты численного исследования характеристик направленности антенной решетки с металлодиэлектрическим обтекателем.** Известно [29, 30], что при построении УФ могут быть использованы результаты конструктивного синтеза ЧИП. Опираясь на приведенные выше результаты конструктивного синтеза ЧИП, можно утверждать, что наиболее предпочтительным вариантом выполнения УФ является конструкция, в которой совмещены топологии, показанные на рис. 2 и 6. Пример конструктивной реализации такого УФ показан на рис. 11. Как видно из рис. 11, угловой фильтр является многослойным и состоит из трех решеток скрещенных металлических брусьев 3, образующих отрезки квадратных волноводов, и диэлектрических слоев укрытия 6, прокладок 5 и подложки 4.

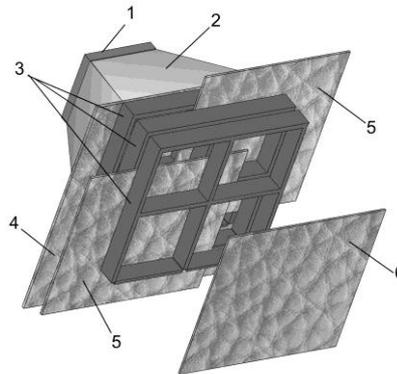


Рис. 11. Рупорный излучатель плоской антенной решетки с угловым фильтром:  
1 – отрезок квадратного волновода в горловине рупора; 2 – раствор пирамидального рупора; 3 – дифракционные решетки из скрещенных металлических брусьев; 4 – диэлектрическая подложка; 5 – диэлектрические прокладки; 6 – диэлектрическое укрытие

Данный УФ имеет следующие параметры: число каскадно-включенных дифракционных решеток – 3; число диэлектрических слоев – 5; шаги решеток  $A_1 = B_1 \approx 0,685 \cdot \lambda_0$ ; толщина брусьев  $t_1 \approx 0,1567 \cdot \lambda_0$ ; ширина брусьев  $w \approx 0,039267 \cdot \lambda_0$ ; толщины диэлектрического укрытия и каждой из прокладок  $t_2 \approx 0,01 \cdot \lambda_0$ ; диэлектрическая подложка состоит из двух диэлектрических слоев, выполненных из такого же материала, как укрытие и прокладки. В качестве материала диэлектрических слоев УФ можно использовать Arlon AD410 (материал 1) или Arlon AD600 (материал 2).

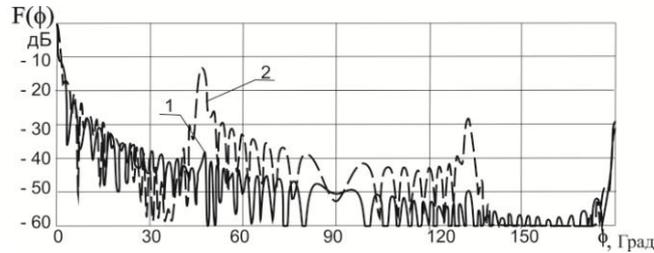


Рис. 12. Диаграмма направленности антенной решетки в азимутальной плоскости: 1 – АР без УФ; 2 – АР с УФ

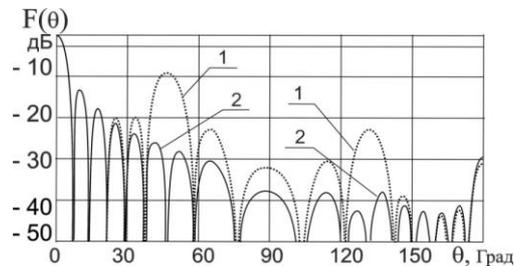


Рис. 13. Диаграмма направленности антенной решетки в угломестной плоскости: 1 – АР без УФ; 2 – АР с УФ

На рис. 9 и 10 показаны ДН одиночного излучателя из состава АР, в качестве антенных обтекателей которого выступают угловые фильтры, имеющие одинаковую конструкцию, показанную на рис. 11. При этом между собой УФ различаются только тем, что диэлектрические слои УФ в случае, изображенном на рис. 9, выполнены из материала 1, а в случае, изображенном на рис. 10, из материала 2. Как видно из графиков, показанных на рис. 12 и 13, введение УФ в состав АР позволяет подавить нежелательные ПГМ в её ДН.

Из приведенных результатов численных экспериментов следует, что размещением перфорированных экранов внутри диэлектрика и выбором параметров последнего можно синтезировать угловые характеристики такой электродинамической структуры, приближая их к виду, необходимому для реализации функций пространственного фильтра.

**Заключение.** На основе численных исследований характеристик рассеяния многоэлементных мультипланарных решеток печатных элементов выработаны рекомендации по конструкционным параметрам многослойных ЧИП и УФ, выступающих в качестве многофункциональных антенных обтекателей антенной решетки приемо-передающего РЭС. Проведенные численные исследования дают право утверждать, что использование микрополосковых отражательных антенных решеток с печатными элементами, имеющими сложную топологию на многослойных магнетодиэлектрических подложках, открывает дополнительные возможности по частотной и пространственной фильтрации полей прошедших сквозь такие решетки волн, обеспечивая возможность развязки источников, имеющих близкие рабочие частоты и подавление ПГМ в ДН разреженных АР, что позволяет рекомендовать их для использования в составе обтекателей перспективных РЭС.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каплун В.А.* Обтекатели антенн СВЧ (Радиотехнический расчет и проектирование). – М.: Сов. радио, 1974. – 240 с.
2. *Касьянов А.О.* Частотно-избирательные поверхности. Методы проектирования и области применения: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 150 с.
3. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Отражательные антенные решетки как микроволновые компоненты интеллектуальных покрытий // Антенны. – 2001. – Вып. 4 (50). – С. 12-16.
4. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Численное исследование многофункциональных обтекателей антенн судовых РЛС // Матер. 3-й МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» – (ПТСПИ'99). – Владимир, 1999. – С. 160-166.
5. *Касьянов А.О., Кошкидько В.Г.* Применение электродинамических методов анализа при разработке антенных систем судовых РЛС // Известия ТРТУ. – 2000. – № 1 (15). – С. 19.
6. *Касьянов А.О.* Обтекатель антенны судовой радиолокационной станции // Тр. Международной научной конференции "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" ИРЭМВ-2003, 16-20 июня 2003 г. – Таганрог: ТРТУ. – С. 96-99.
7. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* «Дифракционные решетки как устройства пространственно-частотной и поляризационной селекции» // Сб. трудов III Международного симпозиума «Конверсия науки – международному сотрудничеству» (Сибконверс'99). – Томск, 1999. – С. 406-408.
8. *Kasyanov A.O., Obukhovets V.A.* Polarizing filters, converters and modulators based on controllable microstrip diffraction arrays // Proceedings of III International Seminar/Workshop on DIPED'98, 2-5 November 1998, Tbilisi. – P. 46-49.
9. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Поляризационные фильтры, преобразователи и модуляторы на основе управляемых микрополосковых дифракционных решеток // Всерос. конф. «Компьютерные технологии в инженер. и управлен. деятельности»: Сб. тр. Ч. 2. – Таганрог, 1999. – С. 121-126.
10. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Частотно-избирательные поверхности. Основные области применения // Антенны. – 2005. – Вып. 9 (100). – С. 4-12.
11. *Красюк В.Н.* Антенны СВЧ с диэлектрическими покрытиями – Л.: Судостроение, 1986.
12. *Касьянов А.О.* Математическое моделирование и расчет характеристик рассеяния печатного частотно-избирательного антенного обтекателя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 6 (216). – С. 129-139.
13. *Касьянов А.О.* Результаты численного исследования характеристик рассеяния печатного частотно-избирательного антенного обтекателя // Матер. 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 7-12 сентября 2020 г. – Севастополь, Крым: Изд-во СевГУ, 2020. – С. 165-166.
14. *Besso P., Bozzi M., Perregrini L., Salghetti Drioli L., and Nickerson W.* Deep Space Antenna for Rosetta Mission: Design and Testing of the S/X-Band Dichroic Mirror // IEEE Trans. Antennas Propag. – March 2003. – Vol. AP-51, No. 3. – P. 388-394.
15. *Bozzi M., Perregrini L., Weinzierl J., and Winnewisser C.* Efficient Analysis of Quasi-Optical Filters by a Hybrid MoM/BI-RME Method // IEEE Trans. Antennas Propag. – July 2001. – Vol. AP-49, No. 7. – P. 1054-1064.
16. *Bozzi M., Perregrini L., Weinzierl J., and Winnewisser C.* Design, Fabrication, and Measurement of Frequency-Selective Surfaces // Optical Engineering. – Aug. 2000. – Vol. 39, No. 8. – P. 2263-2269.
17. *Winnewisser C., Lewen F., Schall M., Walther M., and Helm H.* Characterisation and Application of Dichroic Filters in the 0.1 to 2 THz Region // IEEE Trans. Microwave Theory & Techniques. – April 2000. – Vol. MTT-48, No. 4. – P. 744-749.
18. *Besso P., Bozzi M., Brenner M., Junker S., Madde R., Perregrini L., and Salghetti Drioli L.* Electrical and Mechanical Performance of a S/X/Ka-Band Dichroic Mirror // Proc. of EuMC. Oct. 3-5, 2000. – Paris, France, 2000. – P. 290-293.
19. *Chen J.C.* Analysis of a thick dichroic plate with rectangular holes at arbitrary angles of incidence," TDA Progress Report 42-104, October-December 1990, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
20. *Franchi P.R. and Mailloux R.J.* Theoretical and experimental study of metal grid angular filters for sidelobe suppression // IEEE Trans. Antennas Propagat. – May 1983. – Vol. 31. – P. 445-450.

21. *Biosca J., Llorens D., and Vigano M.C.* Side-lobe reduction with overlapped beam-forming network for Ku-band hybrid antenna array // in Proc. 10th Eur. Conf. Antennas Propag., Davos, Switzerland, 2016. – P. 1-5.
22. *Lee Y.J., Jeong S.H., Park W.S., Yun J.S., and Jeon S.I.* Multilayer spatial angular filter with air gap tuners to suppress grating lobes of 4 x 1 array antenna // Electron. Lett. – Jan. 2003. – Vol. 39, No. 1. – P. 15-17.
23. *Martinez-Ros A.J., Gomez-Tornero J.L., and Goussetis G.* Multifunctional angular bandpass filter SIW leaky-wave antenna // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. – 2017. – Vol. 16. – P. 936-939.
24. *Mailloux R.J.* Synthesis of spatial filters with Chebyshev characteristics // IEEE Trans. Antennas Propagat. – Mar. 1976. – Vol. AP-24. – P. 174-181.
25. *Rope E.L., Tricoles G., Yue O.C.* Metallic, angular filters for array economy // in IEEE Antennas Propagat. Int. Symp. Dig. – 1976. – P. 155-157.
26. *Хансен Р.* Сканирующие антенные системы СВЧ. Т. 1-2. – М.: Советское радио, 1966. – Т. 1. – 536 с. – Т. 2. – 496 с.
27. *Rope E.L., Tricoles G., Yue O.C.* Metallic, Angular Filters For Arrays Economy // AP-S Session 5, 1610, Tuesday, October 12, Room 163-173. – P. 155-157.
28. *Kinowski D., Guglielmi M., Roederer A.G.* Angular Bandpass Filters: An Alternative Viewpoint Gives Improved Design Flexibility // IEEE Trans. Antennas and Propag. – 1995. – Vol. AP43, No. 4. – P. 390-395.
29. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Металлодиэлектрические частотно-избирательные поверхности // Электромагнитные волны и электронные системы. Радиотехника. – 2009. – Т. 14, № 11. – С. 29-38.
30. *Касьянов А.О., Касьянова А.Н.* Электродинамический анализ и разработка САПР-ориентированных математических моделей печатных антенных решеток: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. – 300 с.

## REFERENCES

1. *Kaplun V.A.* Obtekateli antenn SVCh (Radiotekhnicheskiiy raschet i proektirovanie) [Fairings of microwave antennas (Radio engineering calculation and design)]. Moscow: Sov. radio, 1974, 240 p.
2. *Kas'yanov A.O.* Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya: monografiya [Frequency-selective surfaces. Design methods and application areas: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 150 p.
3. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Otrazhatel'nye antennnye reshetki kak mikrovolnovye komponenty intellektual'nykh pokrytiy [Reflective antenna arrays as microwave components of smart coatings], *Antenny* [Antennas], 2001, Issue 4 (50), pp. 12-16.
4. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Chislennoe issledovanie mnogo-funktional'nykh obtekatel'nykh antenn sudovykh RLS [Numerical study of multifunctional radome antennas], *Mater. 3-y MNTK «Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii» – (PTSPI'99)* [Materials of the 3rd ISTC "Perspective technologies in the media of information transmission" – (PTSPI'99)]. Vladimir, 1999, pp. 160-166.
5. *Kas'yanov A.O., Koshkid'ko V.G.* Primenenie elektrodinamicheskikh metodov analiza pri razrabotke antennnykh sistem sudovykh RLS [Application of electrodynamic methods of analysis in the development of ship radar antenna systems], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2000, No. 1 (15), pp. 19.
6. *Kas'yanov A.O.* Obtekatel' antenny sudovoy radiolokatsionnoy stantsii [Fairing of the ship radar station antenna], *Tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Izsluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln" IREMV-2003, 16-20 iyunya 2003 g.* [Proceedings of the International Scientific Conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves" IREMV-2003, June 16-20, 2003]. Taganrog: TRTU, pp. 96-99.
7. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Difraktsionnye reshetki kak ustroystva prostranstvenno-chastotnoy i polarizatsionnoy selektsii [Diffraction gratings as devices of spatial-frequency and polarizing selection], *Sb. trudov III Mezhdunarodnogo simpoziuma «Konversiya nauki – mezhdunarodnomu sotrudnichestvu» (Sibkonvers'99)* [Proceedings of the III International Symposium "Conversion of science to International cooperation" (Sibconverse '99). Tomsk, 1999, pp. 406-408.

8. Kasyanov A.O., Obukhovets V.A. Polarizing filters, converters and modulators based on controllable microstrip diffraction arrays, *Proceedings of III International Seminar/Workshop on DIPED'98, 2-5 November 1998, Tbilisi*, pp. 46-49.
9. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Polyarizatsionnye fil'try, preobrazovateli i modulyatory na osnove upravlyaemykh mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Polarized filters, converters and modulators based on controlled microstrip diffraction gratings], *Vseros. konf. «Komp'yuternye tekhnologii v inzhener. i upravlen. deyatel'nosti»: Sb. tr.* [All-Russian Conference "Computer Technologies in Engineering and Business Management": Collection of works]. Part 2. Taganrog, 1999, pp. 121-126.
10. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Osnovnye oblasti primeneniya [Frequency-selective surfaces. Main application areas], *Antenny* [Antennas], 2005, Issue 9 (100), pp. 4-12.
11. Kras'yuk V.N. Antenny SVCh s dielektricheskimi pokrytiyami [Microwave antennas with dielectric coatings]. Leningrad: Sudostroenie, 1986.
12. Kas'yanov A.O. Matematicheskoe modelirovanie i raschet kharakteristik rasseyaniya pechatnogo chastotno-izbiratel'nogo antennogo obtekatelya [Mathematical modeling and calculation of the scattering characteristics of a printed frequency-selective antenna fairing], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6 (216), pp. 129-139.
13. Kas'yanov A.O. Rezul'taty chislennogo issledovaniya kharakteristik rasseyaniya pechatnogo chastotno-izbiratel'nogo antennogo obtekatelya [Results of a numerical study of the scattering characteristics of a printed frequency-selective antenna fairing], *Mater. 30-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii «SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii», 7-12 sentyabrya 2020 g.* [Proceedings of the 30th International Crimean Conference "Microwave Technology and Telecommunications Technologies", September 7-12, 2020]. Sevastopol', Krym: Izd-vo SevGU, 2020, pp. 165-166.
14. Besso P., Bozzi M., Perregrini L., Salghetti Drioli L., and Nickerson W. Deep Space Antenna for Rosetta Mission: Design and Testing of the S/X-Band Dichroic Mirror, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, March 2003, Vol. AP-51, No. 3, pp. 388-394.
15. Bozzi M., Perregrini L., Weinzierl J., and Winnewisser C. Efficient Analysis of Quasi-Optical Filters by a Hybrid MoM/BI-RME Method, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, July 2001, Vol. AP-49, No. 7, pp. 1054-1064.
16. Bozzi M., Perregrini L., Weinzierl J., and Winnewisser C. Design, Fabrication, and Measurement of Frequency-Selective Surfaces, *Optical Engineering*, Aug. 2000, Vol. 39, No. 8, pp. 2263-2269.
17. Winnewisser C., Lewen F., Schall M., Walther M., and Helm H. Characterisation and Application of Dichroic Filters in the 0.1 to 2 THz Region, *IEEE Trans. Microwave Theory & Techniques*, April 2000, Vol. MTT-48, No. 4, pp. 744-749.
18. Besso P., Bozzi M., Brenner M., Junker S., Madde R., Perregrini L., and Salghetti Drioli L. Electrical and Mechanical Performance of a S/X/Ka-Band Dichroic Mirror, *Proc. of EuMC. Oct. 3-5, 2000*. Paris, France, 2000, pp. 290-293.
19. Chen J.C. Analysis of a thick dichroic plate with rectangular holes at arbitrary angles of incidence," TDA Progress Report 42-104, October-December 1990, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
20. Franchi P.R. and Mailloux R.J. Theoretical and experimental study of metal grid angular filters for sidelobe suppression, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, May 1983, Vol. 31, pp. 445-450.
21. Biosca J., Llorens D., and Vigano M.C. Side-lobe reduction with overlapped beam-forming network for Ku-band hybrid antenna array, in *Proc. 10th Eur. Conf. Antennas Propag., Davos, Switzerland, 2016*, pp. 1-5.
22. Lee Y.J., Jeong S.H., Park W.S., Yun J.S., and Jeon S.I. Multilayer spatial angular filter with air gap tuners to suppress grating lobes of 4 x 1 array antenna, *Electron. Lett.*, Jan. 2003, Vol. 39, No. 1, pp. 15-17.
23. Martinez-Ros A.J., Gomez-Tornero J.L., and Goussetis G. Multifunctional angular bandpass filter SIW leaky-wave antenna, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2017, Vol. 16, pp. 936-939.
24. Mailloux R.J. Synthesis of spatial filters with Chebyshev characteristics, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Mar. 1976, Vol. AP-24, pp. 174-181.

25. *Rope E.L., Tricoles G., Yue O.C.* Metallic, angular filters for array economy, in *IEEE Antennas Propagat. Int. Symp. Dig.*, 1976, pp. 155-157.
26. *Khansen R.* Skaniruyushchie antennnye sistemy SVCh [Scanning antenna systems of microwave]. Vol. 1-2. Moscow: Sovetskoe radio, 1966, Vol. 1, 536 p., Vol. 2, 496 p.
27. *Rope E.L., Tricoles G., Yue O.C.* Metallic, Angular Filters For Arrays Economy, *AP-S Session 5, 1610, Tuesday, October 12, Room 163-173*, pp. 155-157.
28. *Kinowski D., Guglielmi M., Roederer A.G.* Angular Bandpass Filters: An Alternative Viewpoint Gives Improved Design Flexibility, *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, 1995, Vol. AP43, No. 4, pp. 390-395.
29. *Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A.* Metallodielektricheskie chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti [Metal-dielectric frequency-selective surfaces], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. Radiotekhnika* [Electromagnetic waves and electronic systems. Radio engineering], 2009, Vol. 14, No. 11, pp. 29-38.
30. *Kas'yanov A.O., Kas'yanova A.N.* Elektrodinamicheskiy analiz i razrabotka SAPR-orientirovannykh matematicheskikh modeley pechatnykh antenykh reshetok: monografiya [Electrodynamics analysis and development of CAD-oriented mathematical models of printed antenna arrays: monograph]. Taganrog: Izd-tvo YuFU, 2017, 300 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

**Касьянов Александр Олегович** - Южный федеральный университет, e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем, д.т.н., профессор.

**Kasyanov Alexander Olegovich** – Southern Federal University; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio engineering and telecommunication systems; dr. of eng. sc.; professor

УДК 004.657

DOI 10.18522/2311-3103-2021-2-104-112

**П.А. Курапов**

## **ГИБРИДНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЗАПРОСОВ К АНАЛИТИЧЕСКИМ БАЗАМ ДАННЫХ**

Для повышения эффективности системам исполнения аналитических запросов необходимо использовать все доступные ресурсы современных распределенных гетерогенных систем. Ускорители, сложная иерархия памяти и распределенность вычислений создают возможности для оптимизации производительности. В статье проводится обзор существующих подходов к реализации механизмов исполнения аналитических запросов к СУБД для данных в оперативной памяти с использованием аппаратных ускорителей, в частности, особое внимание уделено графическим ускорителям. За счет массивного параллелизма и высокой пропускной способности памяти устройства графические ускорители представляют перспективную альтернативу основному устройству исполнения аналитических запросов. Существующие методы не задействуют всех возможностей современной аппаратуры и обычно основываются на передаче данных по относительно медленной шине PCIe для исполнения ядер каждого отдельно взятого оператора. Другой проблемой существующих методов является явное разделение кодовой базы кодогенераторов реляционных операторов для ускорителей (графических процессоров) и центрального процессора, и невозможность переиспользования сгенерированного кода для других устройств в системе, что существенно ограничивает возможности их совместного использования с целью повышения производительности. В статье представлен метод эффективного исполнения запросов на примере системы из двух классов устройств (ЦПУ и графический процессор) при помощи компиляции с построением единого, независимого от устройства, промежуточного представления (SPIR-V) и подход к оптимизации соответствующего гибридного физического плана запроса на основе расширенного классического оператора "Exchange" с использованием гетерогенных вычислительных ресурсов и явным контролем уровня параллелизма.