

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.31>

УДК: 621.372

ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН, НАГРУЖЕННЫХ НА ОТРАЖАЮЩИЕ И НЕОТРАЖАЮЩИЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ ЦЕПИ

**Н.Д. Малютин, М.О. Коноваленко, Г.А. Малютин, А.А. Арутюнян,
Е.И. Тренкаль, Т.А. Чепко**

**Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40**

Статья поступила в редакцию 29 июля 2025 г.

Аннотация. На примере компактной микрополосковой широкополосной антенны, предназначенной для применения в составе малоразмерных БПЛА, исследованы особенности ее характеристик в зависимости от частотных свойств нагрузок. Рассмотрено три варианта нагрузок: в виде согласованной цепи; полосно-пропускающего фильтра отражающего типа; полосно-пропускающего неотражающего фильтра. Проведены исследования частотных характеристики СВЧ тракта, состоящего из антенны, полосно-пропускающего фильтра отражающего или неотражающего типа и источника/приемника сигналов в режиме работы на излучение и обратного рассеяния при облучении антенны. Установлено, что при облучении антенны, нагруженной на фильтр отражающего типа, наблюдается увеличение эффективной площади рассеяния (ЭПР) на отдельных частотах вследствие эффекта переотражения внеполосных частот от нагрузки. Замена отражающего фильтра на неотражающий с единственной полосой пропускания приводит к снижению ЭПР. При этом частотные зависимости коэффициента отражения, диаграммы направленности, ЭПР и коэффициента усиления в первой полосе пропускания близки к параметрам, получаемым при использовании традиционного фильтра

отражающего типа. На частотах же вне полосы пропускания при широкополосном облучении антенны наряду со снижением ЭПР наблюдается эффект подавления паразитных полос пропускания СВЧ тракта приема вследствие поглощения энергии СВЧ колебаний в буферной резонансной цепи неотражающего фильтра. При этом нагрузка в виде неотражающего фильтра согласована как по входу, так и между антенной и фильтром.

Ключевые слова: антенна, нагрузки антенны, отражающий фильтр, неотражающий фильтр, эффективная площадь рассеяния.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2013-0014 от 16.01.2023 г.

Автор для переписки: Малютин Николай Дмитриевич. ndm@main.tusur.ru

Введение

Антенны, объединяемые с частотно-селективными устройствами (фильтрами), в последнее время вызывают повышенный интерес, так как интеграция излучателей и фильтров позволяет решать новые задачи в связи и радиолокации [1]. Такие устройства стали называть фильтрующими антеннами (filtering antenna [2, 3]). Введено также сокращение этого термина – филтенна (filtenna) [4, 5]. Далее будем придерживаться использования термина «антенна», рассматривая антенну как отдельный узел, а термин «антенна-фильтр» будет применяться для обозначения интегрированных антенны и фильтра.

Проблема определения эффективной площади рассеяния антенн в последние годы стала рассматриваться в связи с решением задачи изменения радиолокационных характеристик целей [6]. Уменьшение эффективной площади рассеяния (ЭПР – RCS) повышает возможности выживания беспилотных авиационных средств (БАС) и других объектов. В этом смысле снижение ЭПР можно считать технологией антирадарной скрытности. Отмечается четыре основных метода снижения радиолокационной заметности, а именно: изменение конструкции БАС [7, 8]; введение радиопоглощающих

материалов (РПМ) [9-11]; пассивное подавление и методы активного гашения обратного рассеяния [12]. Первые два метода используются наиболее часто.

В осуществлении метода активного гашения [12] используется пара антенн, подключенных к устройству управления. Падающее на систему поле E^i рассеивается цилиндром при полном поляризационном приеме как E^S . Каждая из антенн $A1$ и $A2$ принимает и переизлучает компенсационное поле, образуется суперпозиция полей $E_{A1}^S + E_{A2}^S$. Для минимизации обратного рассеяния (формирования нуля ЭПР) в пространстве перед цилиндром в выбранном направлении должно выполняться следующее условие $(E_{A1}^S + E_{A2}^S) + E^S = 0$. В этой связи логично предположить, что антенны могут вносить большой вклад в изменение ЭПР, т.к. выше приведенное соотношение может не выполняться и давать максимум обратного рассеяния. Следовательно, учет обратного рассеяния антенн становится все более важным для решения практических задач.

Разработке теории рассеяния антенн посвящены ряд работ периода с конца 60-х годов по настоящее время. Связь свойств антенн как рассеивателей и как излучателей рассмотрена в работах [13, 14]. Как отмечается в работе [15], известная антенная теорема [16-18] устанавливает связь между полным полем рассеяния антенны и его частью по форме, совпадающей с диаграммой направленности этой антенны в режиме передачи. Исследования такой связи позволило решить ряд практически и теоретически важных задач рассеяния [18-20]. Проведенные исследования влияния на ЭПР антенн создали определенный базис для проведения расчетных и экспериментальных работ с целью выявления особенностей обратного рассеяния антенн, нагруженных различным образом.

Недавно разработанные и описанные неотражающие полосно-пропускающие фильтры СВЧ на основе распределенно-сосредоточенных цепей [21–23] представляют возможность их использования в качестве специальных нагрузок в передающих и приемных антеннах. Цель настоящей работы

заключается в определении качественных и количественных отличий эффективной площади обратного рассеяния приемной антенны, диаграммы направленности и коэффициента усиления антенны, нагруженной на СВЧ-фильтры отражающего и неотражающего типов.

1. Объект исследования. Построение частотного плана коэффициентов отражения антенны при нагрузках трех типов

В качестве объекта исследования частотной зависимости параметров излучения и рассеяния взята компактная широкополосная антенна со стабильной формой диаграммы направленности для применения в составе малоразмерных БПЛА [24, 25]. Конструкция основных элементов антенны представлена на рис. 1. В качестве материала печатной платы использован ФАФ-4Д толщиной 1 мм. Размер печатной платы составлял 110×39 мм. Путем изменения размеров антенна настраивалась в полосе частот 0,9-2,1 ГГц.

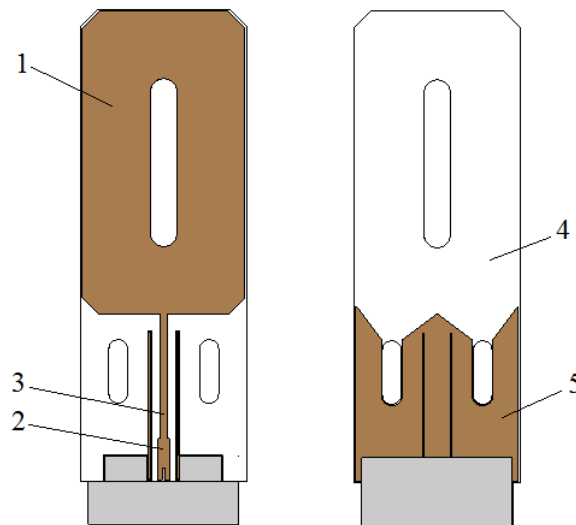


Рис. 1. Конструкция широкополосной антенны, используемой в качестве облучаемой цели [24, 25]: 1 – монополь; 2 – микрополосковая линия с волновым сопротивлением 50 Ом; 3 – четвертьволновый трансформатор; 4 – подложка; 5 – экран.

Последовательность и содержание исследований основаны на построении частотного плана зависимости коэффициента отражения S_{11} при работе антенны на излучение. Ставится и решается задача о влиянии частотных

характеристик разных нагрузок антенны на ЭПР при условии незначительных тепловых потерь в антенне:

1) согласованной нагрузки 50 Ом;

2) традиционного полосно-пропускающего фильтра с минимальным коэффициентом отражения $S_{11} \rightarrow 0$ в полосе пропускания и $S_{11} \rightarrow 1$ в полосах запираания, назовем его отражающим фильтром (ОФ);

2) так называемого неотражающего полосно-пропускающего фильтра (НФ) [22-24] с минимально возможным коэффициентом отражения во всей полосе частот $S_{11} \rightarrow 0$ и единственной полосой пропускания с $S_{21} \rightarrow 0$.

Далее использованы следующие обозначения параметров (рис. 2):

$\Delta f_1, \Delta f_3, \Delta f_5$ – поддиапазоны частот запираания с максимальным коэффициентом отражения $S_{11} \rightarrow 1$;

$\Delta f_2, \Delta f_4$ – поддиапазоны частот пропускания с минимальным коэффициентом отражения $S_{11} \rightarrow 0$.

S_{11}^A – коэффициент отражения антенны;

S_{11}^{OF} – коэффициент отражения фильтра отражающего типа (верхний индекс ОФ);

S_{11}^{HF} – коэффициент отражения фильтра неотражающего типа (верхний индекс НФ);

S_{11}^{A+OF} – коэффициент отражения при нагрузке антенны фильтром отражающего типа (верхний индекс A+ОФ);

S_{11}^{A+HF} – коэффициент отражения при нагрузке антенны фильтром неотражающего типа (верхний индекс A+НФ).

На рис. 2а–д показаны эпюры частотного плана, реализация которого возможна с учетом характеристик антенны (рис. 1), нагруженной на согласованную нагрузку R , отражающий или неотражающий полосно-пропускающий фильтр. Выделены уровни коэффициента отражения в поддиапазонах как шаблон возможной реализации. Рис. 2а отражает частотную

зависимость коэффициента отражения S_{11}^A антенны, нагруженной на согласованную нагрузку R . Рис. 2б показывает типичную частотную зависимость коэффициента отражения S_{11}^{OF} отражающего фильтра СВЧ, имеющего первую рабочую и вторую паразитную полосы частот пропускания в поддиапазонах Δf_2 и Δf_4 . На рис. 2в изображена частотная зависимость коэффициент отражения фильтра неотражающего типа S_{11}^{HF} . Особенность этой зависимости – минимальный S_{11}^{HF} во всех поддиапазонах частот $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \Delta f_4, \Delta f_5$. Включение нагрузки антенны в виде отражающего полосно-пропускающего фильтра с характеристиками, изображенными на рис. 2а и рис. 2б, дает возможность получить зависимость от частоты коэффициента отражения S_{11}^{A+OF} антенны, нагруженной на ОФ. Это показано на рис. 2г. В предположении, что отражающий фильтр не вносит значимые тепловые потери, коэффициент передачи S_{21} фильтра будет максимальным на частотах диапазонов $\Delta f_2, \Delta f_4$ и антенна будет эффективно излучать электромагнитную энергию. Антенна, нагруженная на неотражающее устройство (фильтр) с минимальным коэффициентом отражения S_{11}^{HF} во всех поддиапазонах частот (рис. 2в), будет таким же образом характеризоваться минимально возможным коэффициентом отражения S_{11}^{A+HF} в поддиапазонах частот $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \Delta f_4, \Delta f_5$. В полосе частот Δf_2 коэффициент передачи S_{21}^{A+HF} будет максимальным, т.к. в схеме построения неотражающего устройства включается RLC-цепь, выполняющая функцию резонатора на центральной частоте поддиапазона Δf_2 [22]. В других поддиапазонах частот неотражающий фильтр обеспечивает полосы запираения, но не в результате отражения, а в результате поглощения энергии СВЧ колебаний резистивным элементом RLC-цепи [23, 24].

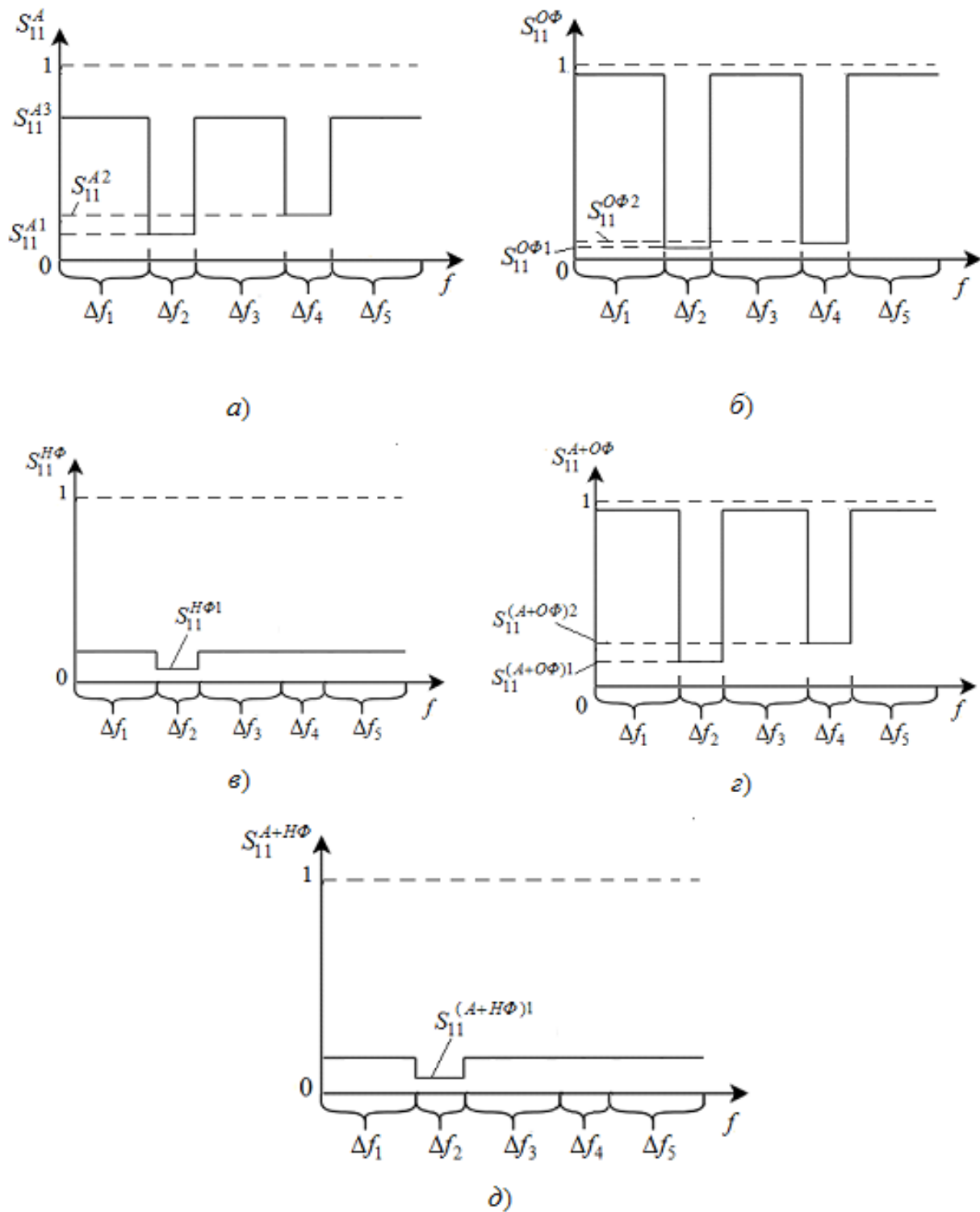


Рис. 2. Эпюры частотного плана зависимости коэффициента отражения антенны, работающей на излучение при разных нагрузках и самих нагрузок: а) – антенны с согласованной нагрузкой R ; б) – отражающего фильтра; в) – неотражающего фильтра; г) – антенны, нагруженной на отражающий полосно-пропускающий фильтр; д) – антенны, нагруженной на неотражающий полосно-пропускающий фильтр.

В этом состоит отличие параметров антенны, нагруженной на неотражающий полосно-пропускающий фильтр, от параметров антенны, нагруженной на отражающий фильтр.

2. Схемы включения антенны при работе на излучение, конструкции фильтров, результаты расчета коэффициентов отражения

Реализация частотного плана, пример построения которого показан в предыдущем разделе, зависит от частотных характеристик каждого из устройств в схеме подачи сигнала на вход антенны.

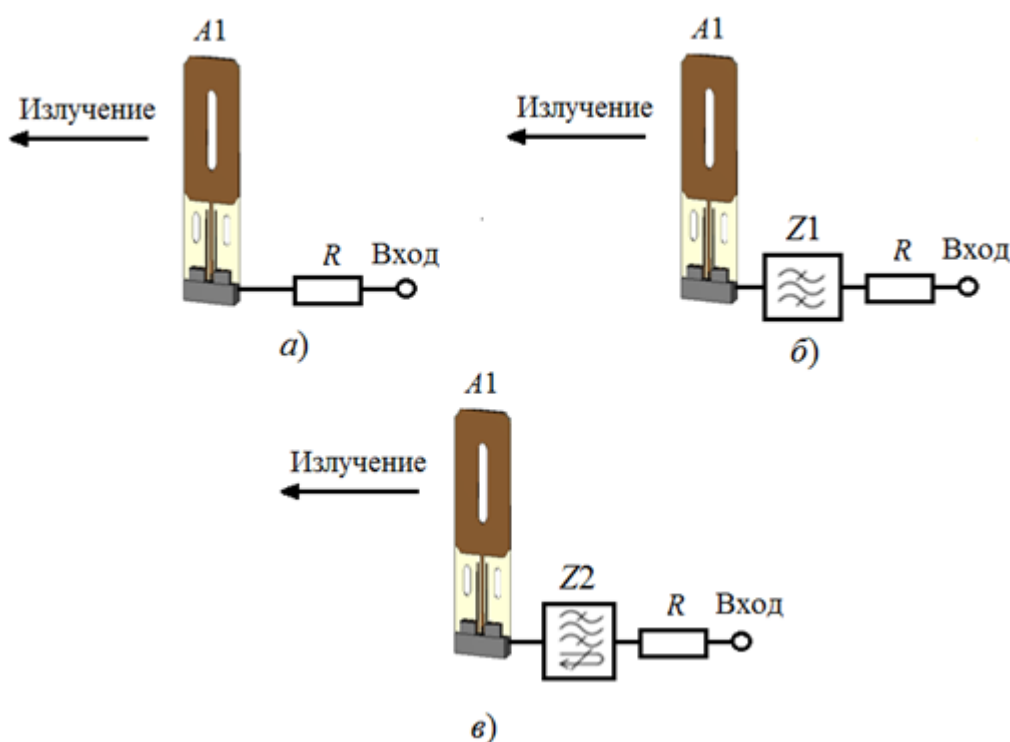


Рис. 3. Схемы включения антенны $A1$ при работе на излучение: а) – согласованная нагрузка R ; б) – нагрузка с импедансом $Z1$ полосно-пропускающим фильтром отражательного типа; в) – нагрузка с импедансом $Z2$ неотражающим полосно-пропускающим фильтром.

Использовались три схемы, показанные на рис. 3: а) – сигнал, заданный во временной области, подается непосредственно на вход антенны $A1$ через коаксиальную линию с волной E_{01} , согласованную с микрополосковым входом антенны; б) – на входе антенны включена частотно-селективная цепь с характеристикой полосно-пропускающего отражающего фильтра (обозначен как ОФ) с импедансом $Z1$; в) – на входе антенны включено неотражающее

устройство в виде неотражающего полосно-пропускающего фильтра (обозначен как НФ) с импедансом Z_2 .

В схеме рис. 3б частотная зависимость Z_1 такова, что в полосе пропускания коэффициент отражения $S_{11}^{Op} \rightarrow 0$, а в полосах записания $S_{11}^{Op} \rightarrow 1$. Схема рис. 3в при включении неотражающего фильтра [21] позволяет минимизировать коэффициент отражения $S_{11}^{H\Phi} \rightarrow 0$, как в полосе пропускания, так и в полосах записания.

Для обозначения неотражающего полосно-пропускающего фильтра на рис. 3в предложено новое графическое обозначение, обозначающее функцию полосно-пропускающего фильтра (знак $\approx$ вверх), и свойство минимального отражения от входа устройства (знак $\nrightarrow$ вниз), возникающее вследствие поглощения отраженной волны в схеме фильтра.

Рассчитывались частотные характеристики полосно-пропускающего фильтра с максимальным коэффициентом отражения в полосах записания и фильтра с минимальным отражением во всей полосе частот. Конструкции фильтров показаны на рис. 4 и рис. 5.

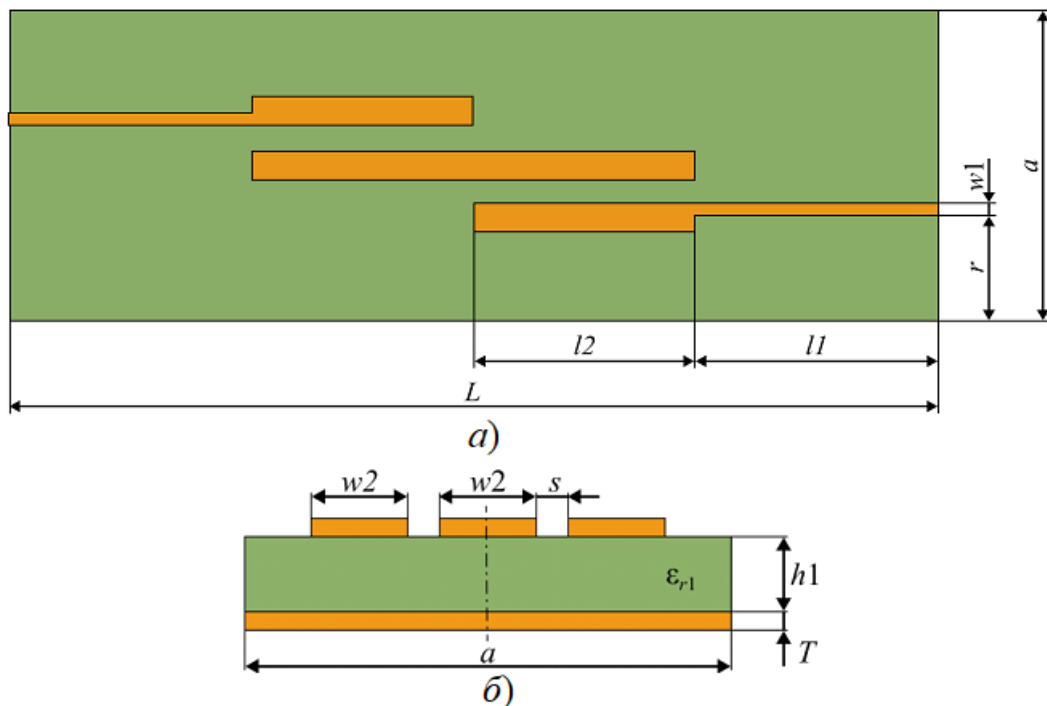


Рис. 4. Топология и размеры проводников отражающего полосно-пропускающего фильтра.

Топология проводников отражающего полосно-пропускающего фильтра показана на рис. 4а, а поперечное сечение полосковых линий на рис. 4б. Относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon_{r1} = 9.9$. Основные параметры конструкции (рис. 4) указаны в

Таблица 1. Размеры платы и линий.

Обозначение топологического параметра	Значение, мм	Обозначение топологического параметра	Значение, мм
$w2$	0,95	$w1$	0,7
s	0,25	r	6
$h1$	1	$l1$	29
T	0,02	$l2$	28
a	14,85	L	114

Топология проводников неотражающего полосно-пропускающего фильтра показана на рис. 5а, поперечное сечение печатной платы на рис. 5б. Основные размеры полосок неотражающего фильтра указаны в таблице 2. Относительные диэлектрические проницаемости подложки $\varepsilon_{r1} = 4,3$, $\varepsilon_{r2} = 3$.

Таблица 2. Размеры полосок неотражающего фильтра.

Обозначение топологического параметра	Значение, мм	Обозначение топологического параметра	Значение, мм
$h3$	0,5	zl	1,6
$w1$	0,6	bw	1,4
$w2$	2	bl	3,8
$h1$	1,5	zw	1,2
T	0,035	l	45
a	20,1	L	60
$w3$	3,8	—	—

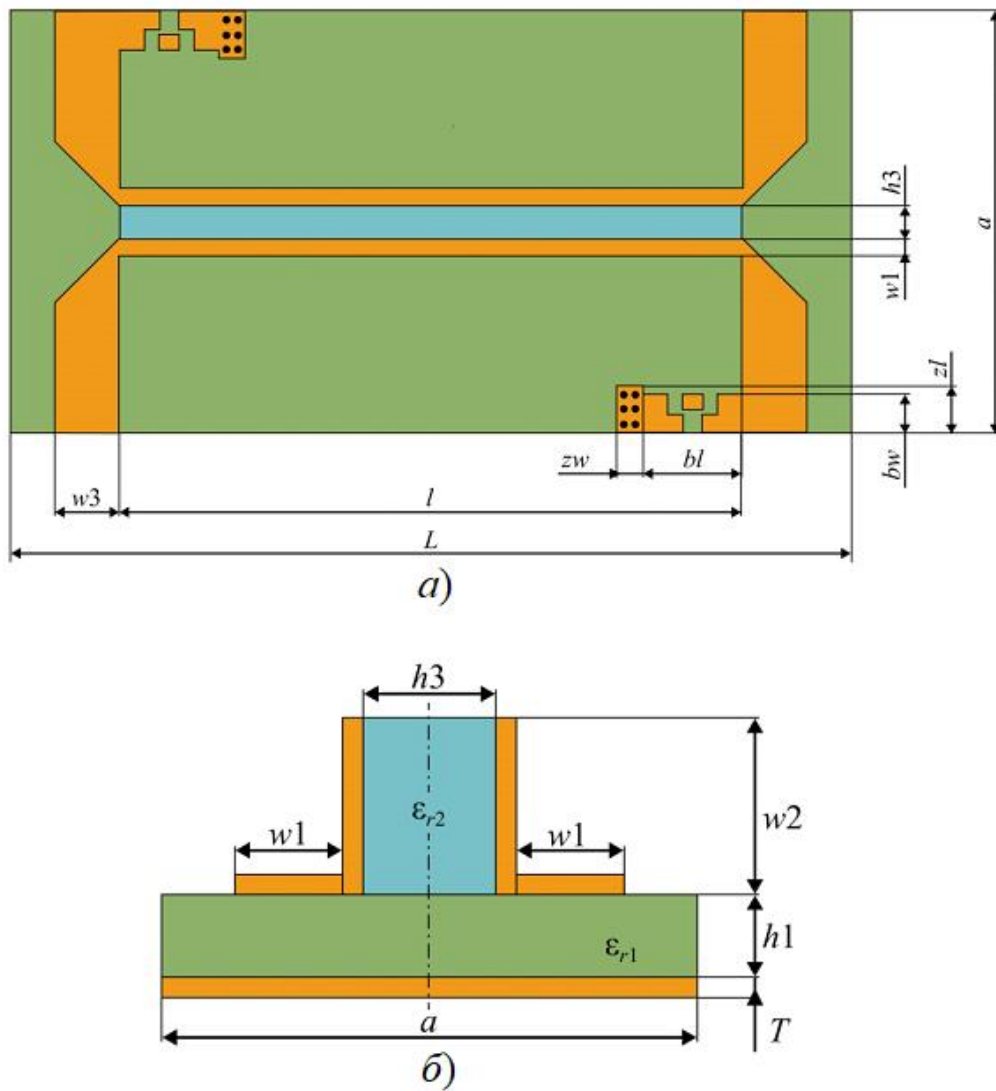


Рис. 5. Конструкция неотражающего фильтра: а) – топология верхнего слоя; б) – поперечное сечение.

На рис. 6 показана частотная зависимость коэффициента отражения S_{11}^A от входа антенны, нагруженной на согласованное сопротивление 50 Ом. Характеристика S_{11}^A соответствует частотному плану рис. 2а. Рис. 7 отображает частотную зависимость коэффициента S_{11}^{Of} фильтра отражающего типа на центральной частоте пропускания 1 ГГц и на частоте 2,08 ГГц паразитной полосы пропускания, что соответствует эюре рис. 2б частотного плана.

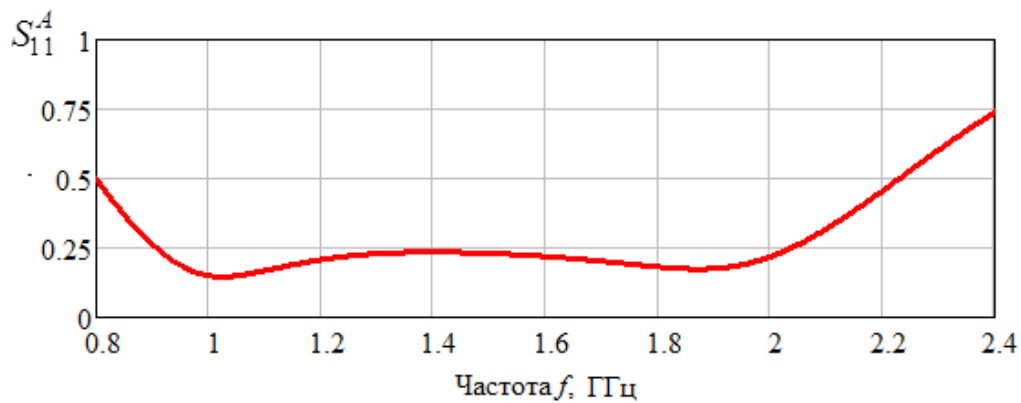


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения S_{11}^A антенны, нагруженной на согласованную нагрузку (рис. 3а).

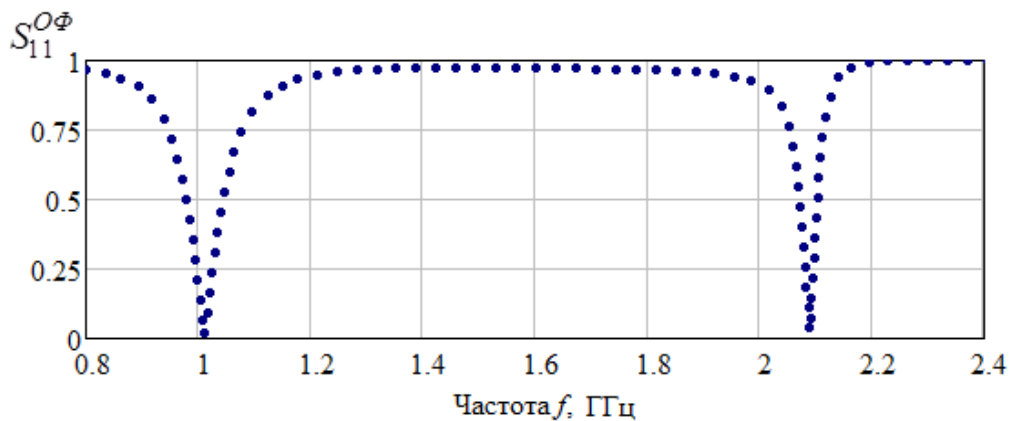


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента отражения $S_{11}^{O\Phi}$ фильтра отражающего типа, нагруженного на сопротивление 50 Ом.

Частотная зависимость коэффициента отражения $S_{11}^{H\Phi}$ неотражающего фильтра показана на рис. 8. Особенность ее в низком уровне отражения в широкой полосе частот так, что полоса пропускания не обнаруживается очевидным образом по $S_{11}^{H\Phi}$. Таким образом, вид частотного плана в виде эпюры рис. 2в принципиально реализуем. Результаты расчета частотных характеристик антенны-фильтра с ОФ и НФ по схемам рис. 3б и рис. 3в показаны на рис. 9, 10. Сравнение графиков рис. 9 с рис. 7 показывает преимущественное влияние отражающего фильтра на формирование частотной зависимости $S_{11}^{A+O\Phi}$, как и было намечено при составлении частотного плана (эпюра рис. 2г).

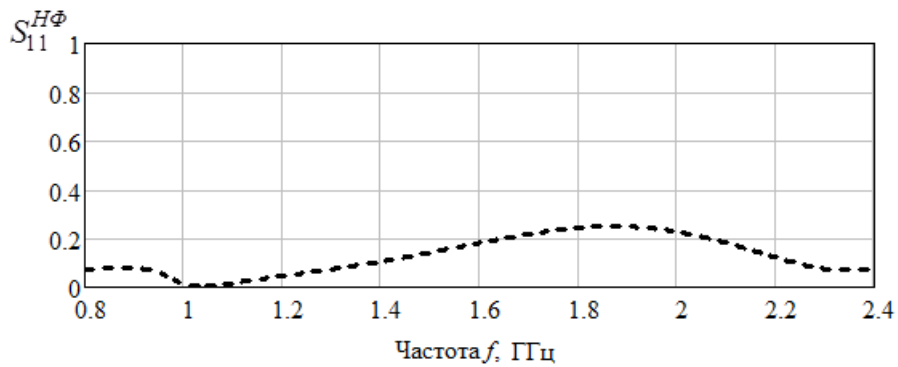


Рис. 8. Частотная зависимость коэффициента отражения $S_{11}^{H\Phi}$ неотражающего фильтра, нагруженного на сопротивление 50 Ом.

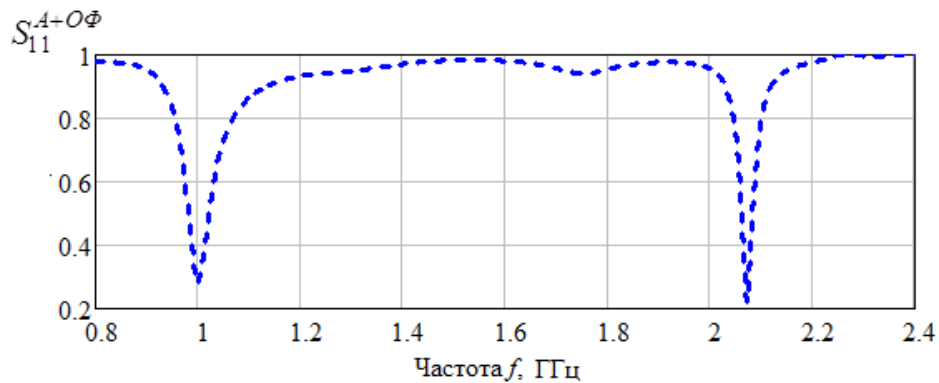


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента отражения $S_{11}^{A+O\Phi}$ антенны-фильтра, нагруженной по схеме рис. 2б отражающим фильтром.

При включении на входе антенны неотражающего фильтра (рис. 3в) по сравнению со схемой рис. 3б происходит уменьшение коэффициента отражения $S_{11}^{A+H\Phi}$, что показано на рис. 10.

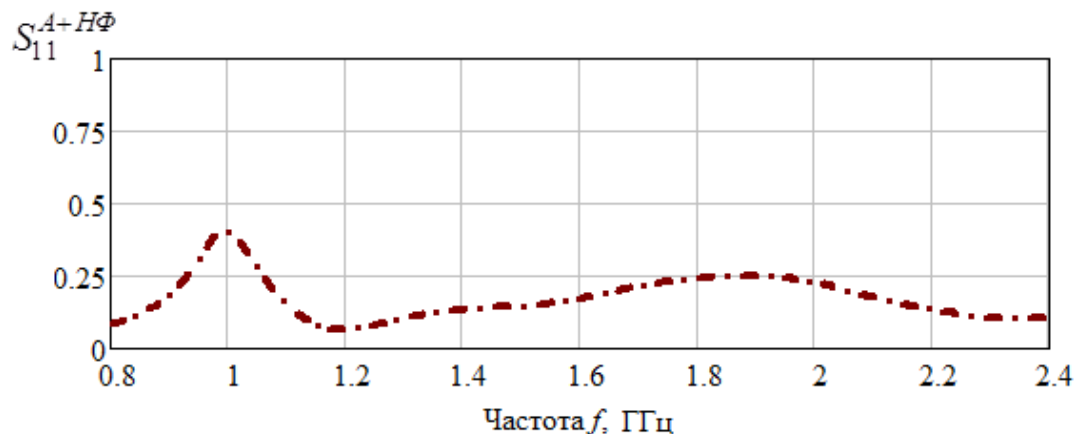


Рис. 10. Частотная зависимость коэффициента отражения $S_{11}^{A+H\Phi}$ антенны, нагруженной по схеме рис. 3в фильтром неотражающего типа.

Нарушение согласования на частоте $f = 1$ ГГц связано с рассогласованием антенны и НФ.

Итак, показаны особенности частотной зависимости коэффициента отражения от входа каскадного соединения антенны и частотно-селективных устройств. Было предположено, что существенная разница входного импеданса цепи антенна-нагрузка при излучении будет влиять на характеристики обратного рассеяния антенны и соответственно на ЭПР при облучении электромагнитным полем с меняющейся частотой.

3. Диаграммы направленности антенны-фильтра в зависимости от частотных характеристик нагрузок

Диаграммы рассчитывались в горизонтальной плоскости при подаче сигнала частот 2,1; 1,8; 1,0 ГГц в соответствии со схемами рис. 3б,в. Обозначения диаграмм направленности (ДН) следующие: $ДН^{A+O\Phi}$ – при включении на входе фильтра отражающего типа, имеющего коэффициент отражения $S_{11}^{O\Phi}$ (рис. 7); $ДН^{A+H\Phi}$ – при включении на входе неотражающего фильтра, имеющего коэффициент отражения $S_{11}^{H\Phi}$ (рис. 8). Результаты расчета $ДН^{A+O\Phi}$ и $ДН^{A+H\Phi}$ показаны на рис. 11. Как и следовало ожидать ДН соответствуют частотным зависимостям коэффициентов отражения $S_{11}^{A+O\Phi}$, $S_{11}^{A+H\Phi}$ антенны, нагруженной различным образом по схемам рис. 3б,в.

4. Изменение ЭПР антенны-фильтра в зависимости от частотных характеристик нагрузок

При облучении антенны широкополосным сигналом наблюдается обратное рассеяние, которое формируется отражением электромагнитного поля от двух сред. Одной такой средой является антенна. Второй средой выступает канал передачи принимаемого сигнала от антенны на вход согласованной нагрузки, либо на вход отражающего или неотражающего фильтра.

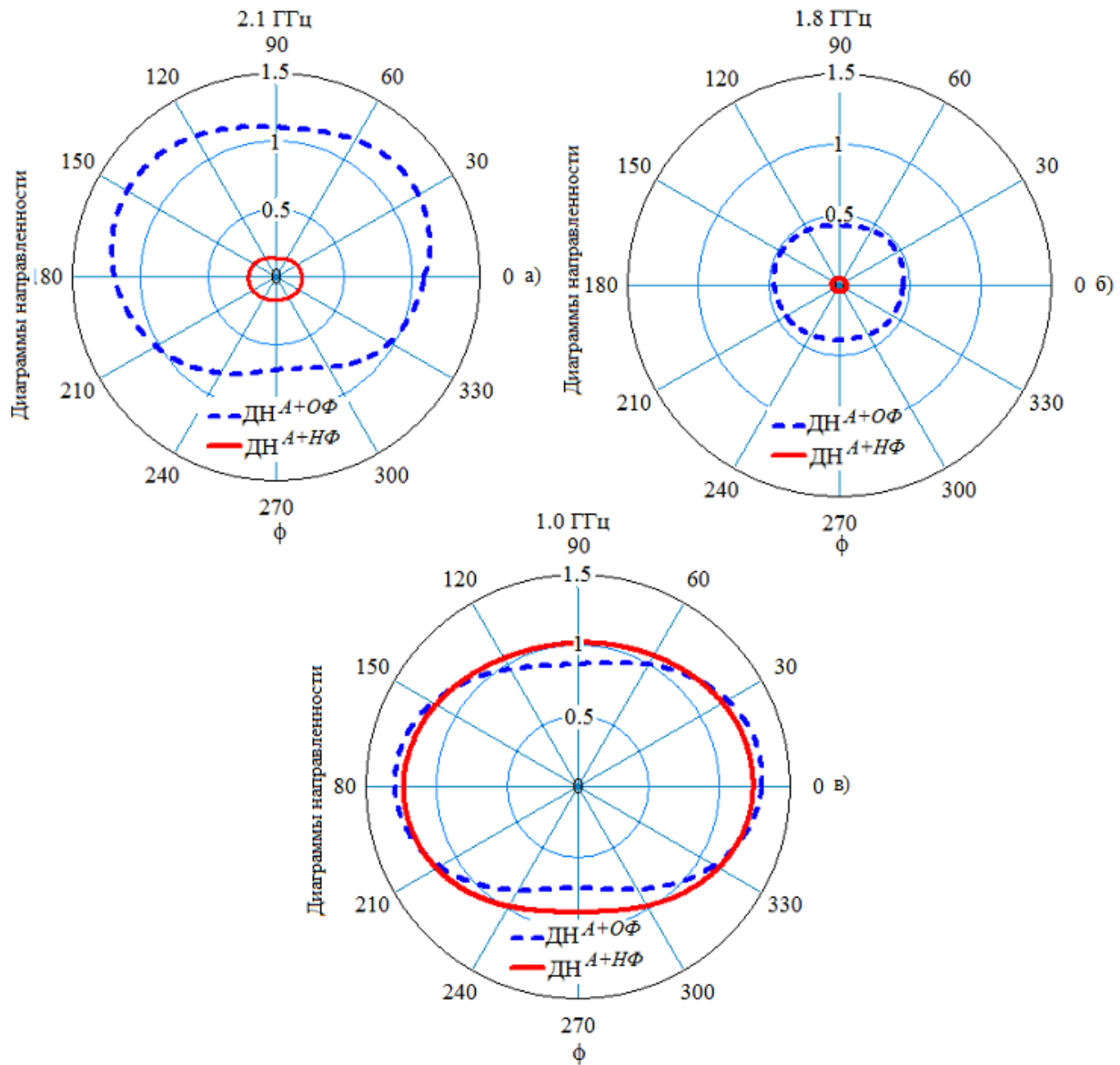


Рис. 11. Сравнение диаграмм направленности антенны в горизонтальной плоскости $DН^{A+O\Phi}$, $DН^{A+H\Phi}$ на частотах 2.1, 1.8, 1.0 ГГц.

Как было показано в разделе 2, от входа антенны, работающей на излучение, во всех трех вариантах ее нагрузки происходит отражение. Минимальное отражение имеет место при включении в схему неотражающего фильтра. Все нагрузки являются взаимными и симметричными устройствами. Поэтому при работе антенны на излучение образуется отраженная волна с коэффициентом отражения S_{11} от входа антенны-фильтра в сторону источника СВЧ энергии. При переходе в режим приема антенны-фильтра в канале антенна-нагрузка в плоскости их стыковки возникает отраженная волна с коэффициентом отражения S_{22} . Эта отраженная волна излучается антенной с

некоторой задержкой по фазе относительно волны, отраженной непосредственно от антенны. Таким образом, обратное рассеяние антенны образуется в соответствии со условной схемой, отображенной на рис. 12. На схеме падающая волна $U_{\text{пад}}$ частично отражается от антенны как от физического объекта, не имеющего выхода. При этом на частотах пропускания антенны часть мощности $U_{\text{пад}}$ попадает в нагрузку и отражается с коэффициентом S_{22} от нагрузки, образуя волну, направленную в сторону излучения антенной в открытое пространство.

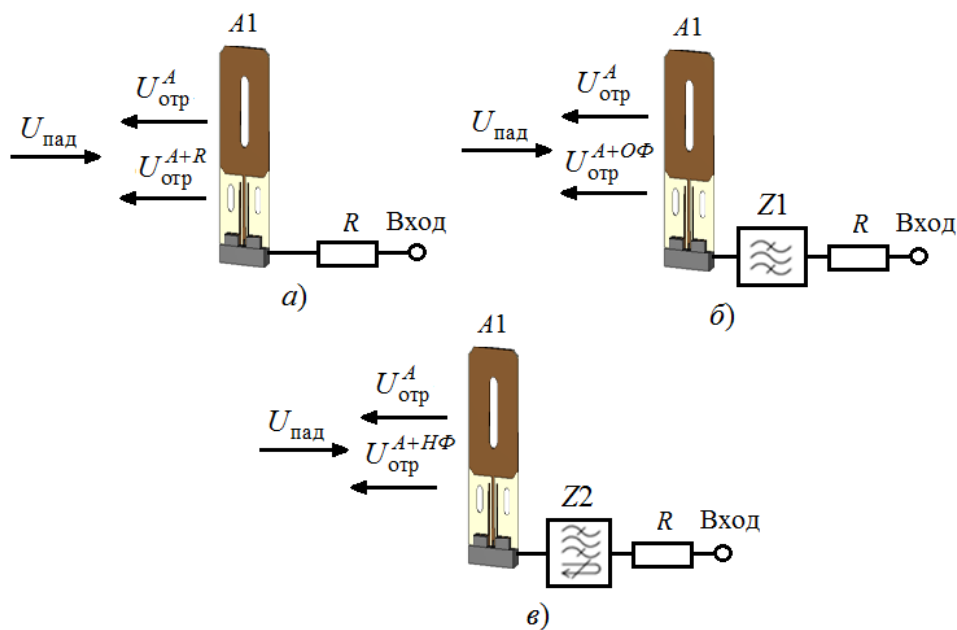


Рис. 12. Схема формирования обратного рассеяния от антенны-фильтра с разными нагрузками.

На схеме рис. 12 $U_{\text{отр}}^{A+O\Phi}$ – волна, отраженная от ОФ, а $U_{\text{отр}}^{A+H\Phi}$ – волна от нагрузки в виде неотражающего фильтра. Поскольку коэффициенты отражения от ОФ и НФ разные (см. эпюры рис. 2б, в, графики зависимости $S_{11}^{O\Phi}$ и $S_{11}^{H\Phi}$ (рис. 7, 8)), между $U_{\text{отр}}^{A+O\Phi}$ и $U_{\text{отр}}^{A+H\Phi}$ будет также существенная разница. Следовательно, ЭПР антенны-фильтра будет зависеть от характеристик фильтров при неизменной нагрузке в виде согласованного сопротивления R .

При проведении численного эксперимента учитывалось отражение от антенны и корпусов фильтров. Визуальная демонстрация построения геометрии при проведении экспериментов показана на рис. 13.

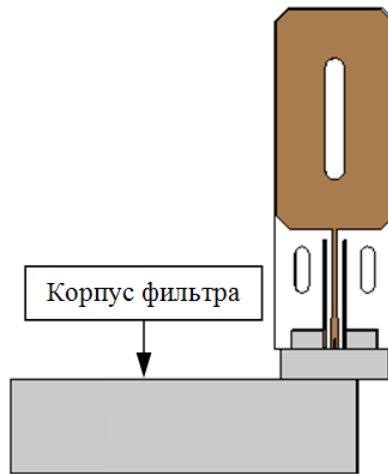


Рис. 13. Визуальная демонстрация построения геометрии при проведении численного эксперимента.

Были построены в виде эюр планы частотной зависимости ЭПР исходя из физических закономерностей и характеристик элементов (рис. 14).

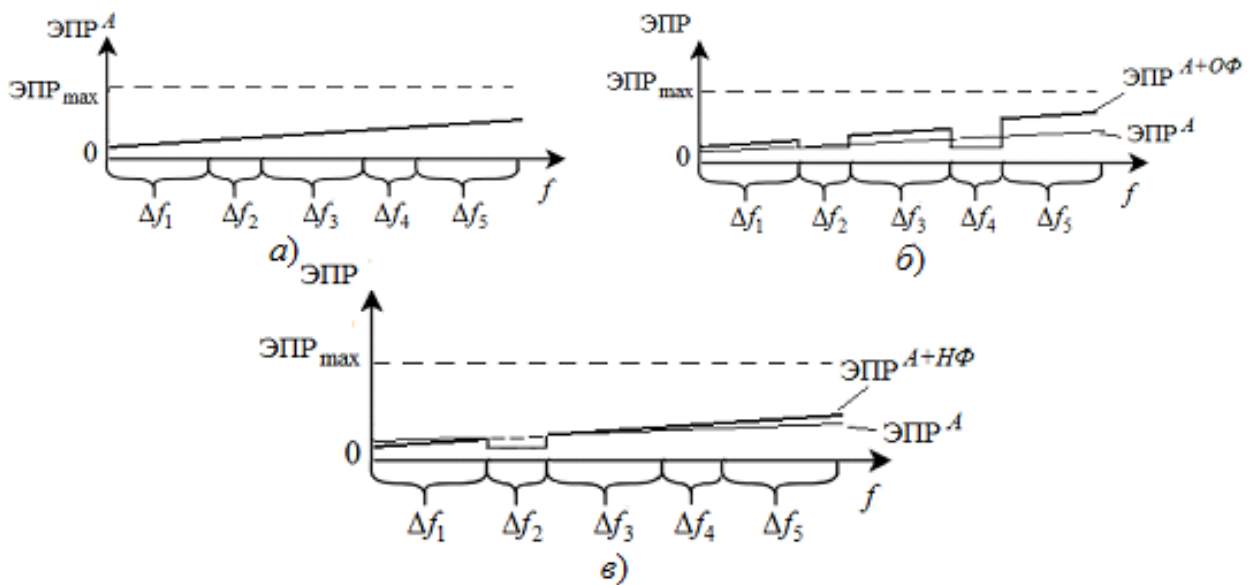


Рис. 14. Эюры частотного плана зависимости ЭПР антенны-фильтра при разных нагрузках.

На этом рисунке использованы обозначения: ЭПР^A – ЭПР антенны, нагруженной на широкополосную согласованную нагрузку; $\text{ЭПР}^{A+O\Phi}$ – ЭПР антенны, нагруженной на отражающий фильтр; $\text{ЭПР}^{A+H\Phi}$ – ЭПР антенны, нагруженной на неотражающий фильтр; $\text{ЭПР}_{\max}$ – максимально возможная ЭПР антенны-фильтра.

Результаты проведенных расчетов ЭПР^A , $\text{ЭПР}^{A+O\Phi}$, $\text{ЭПР}^{A+H\Phi}$ показаны на рис. 15. Они подтверждают основные закономерности формирования ЭПР антенны-фильтра с различающимися типами нагрузок.

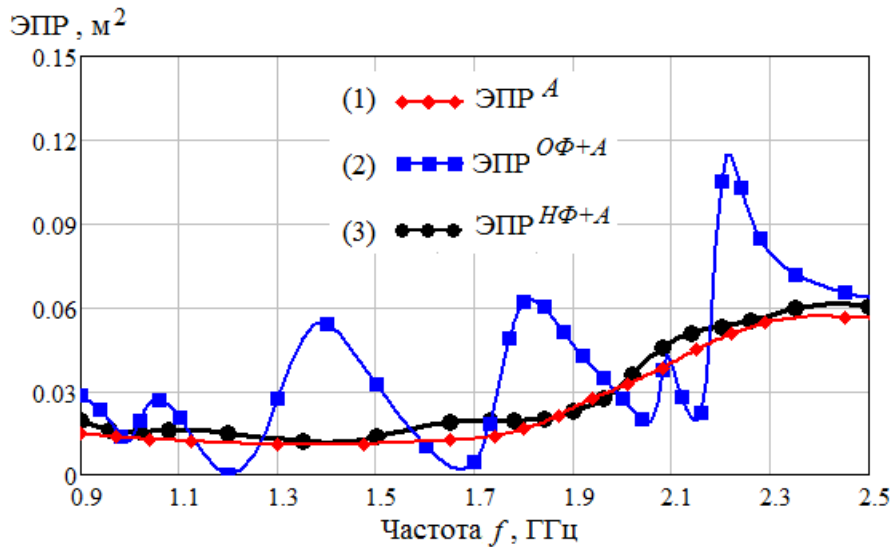


Рис. 15. Частотная зависимость ЭПР антенны-фильтра при разных нагрузках.

Мы видим, что ЭПР^A , $\text{ЭПР}^{A+H\Phi}$ близки и зависят от частоты, возрастая монотонно. Напротив, в частотной зависимости $\text{ЭПР}^{A+O\Phi}$ обнаруживаются колебания с кратным превышением над ЭПР^A и $\text{ЭПР}^{A+H\Phi}$. Это не предсказывается в частотном плане (рис. 14), т.к. не учитывалась интерференция волн $U_{\text{отр}}^{A+O\Phi}$ и $U_{\text{отр}}^A$.

В [12] и других работах установлено, что поля излучения антенны и ее поля рассеяния целиком определяются характеристикой направленности этой антенны в передающем и приемном режиме. Из сравнения $\text{ДН}^{A+O\Phi}$ и $\text{ДН}^{A+H\Phi}$ на рис. 11б видим принципиальную разницу между этими ДН на частоте 1.8 ГГц. На этой частоте в полосе Δf_3 коэффициенты передачи фильтров $S_{21}^{O\Phi}$, $S_{21}^{H\Phi} \rightarrow 0$, но коэффициенты отражения разные $S_{11}^{O\Phi} \rightarrow 1$, $S_{11}^{H\Phi} \rightarrow 0$, что объясняется в первом случае отсутствием поглощения энергии, а во втором — поглощением энергии излучаемого или принимаемого сигнала буферной резонансной нагрузкой неотражающего фильтра. Отсюда и $\text{ЭПР}^{A+H\Phi} \rightarrow 0$, что означает улучшение электромагнитной совместимости антенны-фильтра в полосе частот Δf_3 при использовании неотражающего фильтра.

На рис. 16 приведены зависимости коэффициента усиления филтенны G при нагрузках в виде ОФ и НФ, обозначенных как $G^{ОФ}$ и $G^{НФ}$ соответственно.

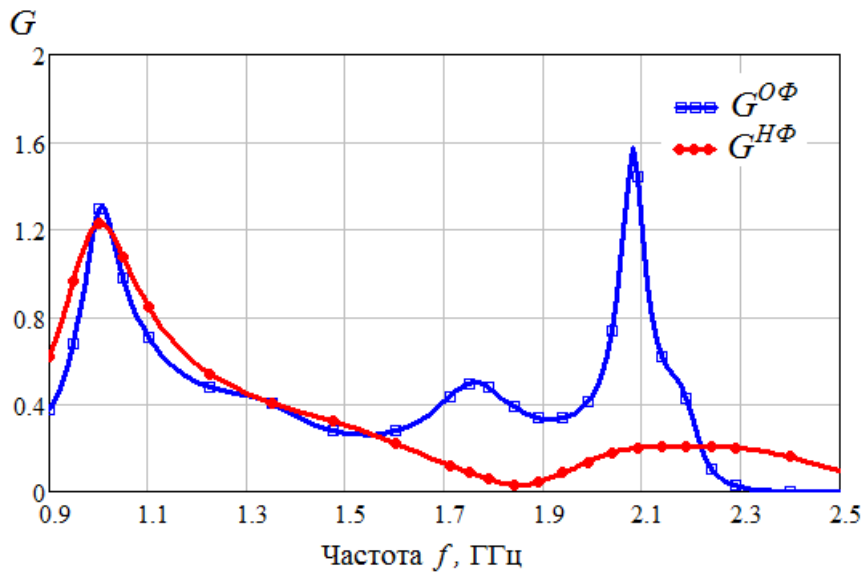


Рис. 16. Частотная зависимость коэффициента усиления антенны-филтара при разных нагрузках.

Заключение

Рассмотрено два варианта построения антенны-филтара с применением частотно-селективных устройств (фильтров) отражающего и неотражающего типа. Излучатель на входе/выходе нагружался традиционным отражающим фильтром с двумя полосами пропускания, совпадающими с рабочими частотами антенны. Получены хорошо известные частотные характеристики СВЧ тракта, состоящего из антенны, полосно-пропускающего филтара и источника/приемника сигналов. Установлено, что в таком варианте исполнения антенны-филтара наблюдается увеличение ЭПР на отдельных частотах широкой полосы частот вследствие эффекта переотражения внеполосных частот от отражающего филтара. Замена отражающего филтара на неотражающий с единственной полосой пропускания приводит к максимально возможному уменьшению ЭПР вследствие подавления внеполосных частот в буферных нагрузках связанных линий филтаров [21]. При этом частотные зависимости коэффициента отражения, диаграммы направленности, ЭПР и

коэффициента усиления антенны-фильтра в полосе пропускания с центральной частотой 1 ГГц близки к параметрам, получаемым при использовании традиционного фильтра отражающего типа. На частотах вне полосы пропускания происходит поглощение СВЧ колебаний, что при широкополосном воздействии на объект установки антенны-фильтра улучшает характеристики электромагнитной совместимости. При этом нагрузка в виде неотражающего фильтра согласована как по входу, так и между антенной и фильтром.

Все возрастающий интерес к исследованиям по уменьшению ЭПР антенн основывается на разных физических принципах [1, 26]. Интеграции антенн с фильтрами и переход к технологии создания антенн-фильтров представляется вполне естественным и достаточно эффективным для снижения ЭПР различных конструкций антенн. Полученные в настоящей работе результаты исследований могут найти применение в радиолокационных и связных системах, а также при проведении радиофизических экспериментов.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2013-0014 от 16.01.23 гг.

Литература

1. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А. Антенна-фильтр // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – №. 4.
2. Chen F.C., Chen J.F., Chu Q.X., and Lancaster M.J. X-band waveguide filtering antenna array with nonuniform feed structure // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2017. vol. 65. No. 12. Pp. 4843-4850. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2705697>
3. Mahmud R.H., and Lancaster M.J. High-gain and wide-bandwidth filtering planar antenna array-based solely on resonators // IEEE Trans. Antennas Propag. 2017. Vol. 65. No. 5. Pp. 2367-2375. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2670443>

4. Yu-Ming Wu; Sai-Wai Wong, Hang Wong, Fu-Chang Chen. A Design of Bandwidth-Enhanced Cavity-Backed Slot Filtenna Using Resonance Windows // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67. Issue 3. P. 1926 – 1930. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2593933>
5. Adnan Nadeem, Noshewan Shoaib, Dimitra Psychogiou, Photos Vryonides, Symeon Nikolaou. Wideband Circularly Polarized Reflectionless Filtenna. 2025 19th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 30 March 2025 – 04 April 2025. <https://doi.org/10.23919/EuCAP63536.2025.10999881>
6. Ying Liu, Yongtao Jia, Shuxi Gong. Antenna Radar Cross Section: Theory and Design. Springer. 2025. 253 P. ISBN 978-981-96-1225-3. ISBN 978-981-96-1226-0 (eBook).
7. Рыжиков М.Б. Изменение эквивалентного поля рассеяния при применении микрополосковых излучателей различной формы // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2004. Вып. 1.
8. Оводенко А.А., Красюк В.Н., Бестугин А.Р., Рыжиков М.Б. Радиозаметность антенных окон гиперзвуковых летательных аппаратов // Изв. Вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 8. С. 5–11.
9. Lutsev L.V., Yakovlev S.V. Microwave properties of granular structures with ferromagnetic nanoparticles. International Conference “Functional Materials”, ICFM-2003, Crimea (Ukraine). 6–11 October 2003. <https://doi.org/10.1063/1.1913797>
10. Петров В., Николайчук Г., Сергей Яковлев С., Луцев Л. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение // Компоненты и технологии. 2008. № 10. С. 147–150.
11. Топалов Ф.С. Численное исследование характеристик рассеяния цилиндрической системы активного гашения на основе управляемой решетки Ван-Атта // Журнал Радиоэлектроники, 2019. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.12>

12. Collin R.E. The Receiving Antenna, Antenna Theory, Part1, R.E. Collin and F.J. Zucker(eds.), McGraw-Hill, New York. 1969. Pp. 123–133.
13. Hansen R.C., Relationships Between Antennas as Scatters and as Radiators, Pro. IEEE. 1989. Vol. 77. Pp. 659–662.
14. Смирнов Е.В. Обобщенная антенная теорема // T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2014. №12. С. 83-87.
15. Кинберн Б.Е., Попов М.П. Обобщение оптической теоремы на случай антенн // Доклады АН СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 615-619.
16. Ерохин Г.А., Кочержевский В.Г. Связь характеристик излучения и рассеяния антенн и проблема минимизации (максимизации) рассеянной мощности // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. №1. С. 86-91.
17. Ерохин Г.А., Кочержевский В.Г. Связь энергии взаимодействия излученного поля и поля рассеяния произвольной антенны с ее диаграммой направленности // Журнал Радиоэлектроники. 1999. № 3.
18. Смирнов Е.В. Об эквивалентной схеме информационного канала взаимодействия приемных антенн // В сборнике: Технологии информационного общества. Сборник трудов XVIII Международной отраслевой научно-технической конференции. Москва, 2024. С. 81-83.
19. Смирнов Е.В. Исследование влияния согласования антенны и ее нагрузки на информационную составляющую поля рассеяния приемных антенн // В сборнике: технологии информационного общества // XI Международная отраслевая научно-техническая конференция: сборник трудов. 2017. С. 187-189.
20. Смирнов Е.В. Минимизация рассеяния приемных антенн при заданной принимаемой мощности // Антенны. 2008. № 2 (129). С. 74-80.
21. Лоцилов А.Г., Малютин Н.Д., Чинь То Тхань, Малютин Г.А. Уменьшение возвратных потерь и подавление внеполосных колебаний в межкаскадных соединениях систем связи с помощью неотражающих частотно-селективных цепей СВЧ // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 4. С. 72-94. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2024-4-72-94>

22. Чинь То Тхань, Малютин Н.Д. Малогабаритный неотражающий полосно-пропускающий фильтр // Патент на изобретение RU 2820780, опубл. 10.06.2024, бюл. № 16.
23. Лощилов А. Г, Чинь Т.Т., Малютин Г.А. Полосковый неотражающий полосно-пропускающий перестраиваемый фильтр // Патент на изобретение RU 2819096, бюл. № 1.
24. Евдокимов С.В., Шишкин М.С., Бадеха А.И., Лисовский Д.А., Барышников Е.С., Снигирев С.Д., Маталасов С.Ю. Пат. RU 219304 U1. Двухдиапазонная компактная антенна для беспилотного летательного аппарата. Заявка: 2023105033, 06.03.2023. Оpubл. 11.07.2023. Бюл. № 20.
25. Шишкин М.С. Разработка компактной широкополосной антенны со стабильной формой диаграммы направленности для применения в составе малоразмерных БПЛА. // Журнал радиоэлектроники. 2024. №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.10>
26. Ying Liu, Yongtao Jia, Shuxi Gong. Antenna Radar Cross Section: Theory and Design. 2025. P. 252. <https://doi.org/10.1007/978-981-96-1226-0>

Для цитирования:

Малютин Н.Д., Коноваленко М.О., Малютин Г.А., Арутюнян А.А., Тренкаль Е.И., Чепко Т.А. Характеристики антенн, нагруженных на отражающие и неотражающие частотно-селективные цепи // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.31>