

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ СТЕЛС-ТЕХНОЛОГИЙ

А.Н. Лагарьков, А.И. Федоренко, В.Н. Кисель,
С.Г. Кибец, В.Н. Семененко

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН
(ИТПЭ РАН)

Дан обзор исследований и разработок по снижению радиолокационной заметности летательных аппаратов, проведенных в Институте теоретической и прикладной электродинамики. В частности, в Институте решен ряд фундаментальных и прикладных проблем, связанных с этой задачей, разработана расчетно-экспериментальная методика и технологии снижения заметности; разработан комплекс радиопоглощающих материалов, не уступающих по своим характеристикам лучшим зарубежным образцам. Их применение позволило существенно уменьшить уровень заметности серийных самолетов и других образцов техники.

ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение радиолокационной заметности (РЛЗ) летательных аппаратов является одним из важнейших факторов увеличения эффективности их применения. Авиация представляет собой один из основных компонентов вооруженных сил любой развитой страны. Использование самолетов с низким значением эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) в СВЧ диапазоне обеспечивает успешное преодоление системы ПВО противоборствующей стороны, что наглядно продемонстрировали события последних конфликтов.

ЭПР является основной характеристикой, определяющей свойства самолета как отражающего электромагнитные излучения объекта. Величина ЭПР характеризует способность рассеивающего тела преобразовывать падающую на него электромагнитную волну в рассеянную волну определенной поляризации, распространяющуюся в направлении на приемник. В случае однопозиционной локации, при которой приемник и передатчик расположены в одном месте, ЭПР определяется как

$$\sigma = 4\pi R_0^2 P_r / P_i$$

где R_0 - расстояние между передатчиком и объектом; P_r – плотность потока рассеянной энергии вблизи приемника; P_i – плотность потока падающей энергии вблизи тела.

Величина ЭПР зависит от ориентации объекта относительно луча локатора и от длины волны электромагнитного излучения. Наилучшая аналогия ЭПР для физиков – это дифференциальное сечение рассеяния назад. Например, ЭПР сферы большого (по сравнению с длиной волны) радиуса численно равна

площади ее поперечного сечения, проходящего через центр; при малом радиусе ЭПР сферы описывается иным, релеевским законом (обратно пропорциональна четвертой степени длины волны). В случае, когда объект (например, самолет) имеет сложную форму, а его размеры составляют несколько длин волн и более, то для его ЭПР характерны значительные флуктуации значений при небольшом изменении углов падения электромагнитной волны. Столь сложная картина возникает за счет явлений дифракции и последующей интерференции электромагнитной волны, отраженной от различных частей самолета с соответствующей задержкой фазы от каждого отражающего элемента. На практике интересуются усредненными по относительно небольшому диапазону углов значениями, поскольку вследствие неизбежных колебаний траектории полета именно эти средние значения определяют уровень сигнала, обрабатываемого в приемнике. Задача стелс-технологий заключается в максимально возможном уменьшении ЭПР различных объектов.

В статье рассмотрены методы уменьшения ЭПР элементов конструкции серийных самолетов, которые изначально создавались без предъявления требований к РЛЗ. Их модернизация и нанесение системы радиопоглощающих покрытий (РПП) позволяет на порядок величины уменьшить ЭПР и существенно повысить боевую эффективность авиации, особенно при применении средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ). По этому пути идут передовые американские и европейские авиастроительные компании, которые кроме разработки новых самолетов, в геометрической форме которых предусмотрены требования к РЛЗ, модернизируют также самолеты с традиционными формами. Естественно, многие вопросы приемы и методы стелс-технологий представляют собой закрытые сведения, но основные принципы снижения РЛЗ хорошо изучены и описаны как в зарубежной, так и в российской литературе (см., например, [1-5]). Здесь мы рассмотрим лишь те вопросы, которые традиционно обсуждаются в открытых научных статьях, на конференциях и семинарах.

При постановке задачи уменьшения РЛЗ серийного самолета традиционной формы обычно требуется максимально уменьшить ЭПР в передней и задней полусферах, не внося каких-либо принципиальных изменений в его конструкцию. Пусть ЭПР самолета имеет вид, изображенный на рис. 1 сплошной линией.

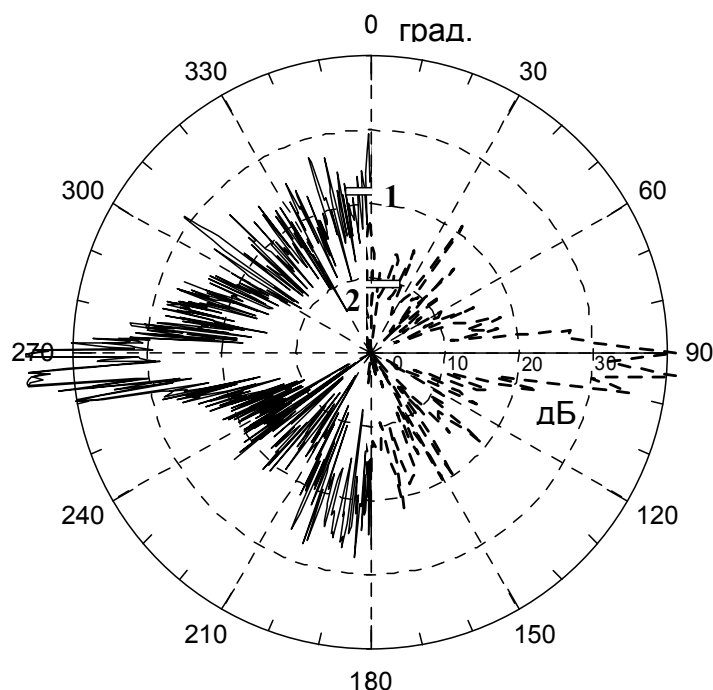


Рис. 1. Диаграммы ЭПР самолета, измеренные до (уровень 1) и после (уровень 2) применения мер по снижению РЛЗ

На практике, благодаря применению РПП и радиопоглощающих материалов (РПМ), удается уменьшить ЭПР самолета и выйти на достаточно низкие уровни ЭПР (см. рис. 1, штриховая линия). Достичь значительного снижения ЭПР самолета с боковых направлений в широком диапазоне длин волн в настоящее время не представляется возможным, так как необходимый для этого вес покрытий оказывается слишком большим (напоминаем, речь идет о самолетах традиционной формы). Конечно, желательно уменьшить ЭПР в широкой полосе, начиная с миллиметрового диапазона до метрового. Однако даже если бы такие тонкие и легкие покрытия с номинальным рабочим диапазоном длин волн от миллиметрового до метрового действительно существовали, нельзя обойти принципиальные ограничения по эффективности их работы на объектах ограниченных размеров. В результате оказывается, что с помощью покрытий практически невозможно уменьшить ЭПР самолета в длинноволновом участке этого диапазона, в реальности удается добиться существенного снижения ЭПР самолета в непрерывной полосе длин волн от 2 до 20 см.

Отметим, что для уменьшения ЭПР самолета применяются покрытия совершенно разных типов как по своим радиофизическим характеристикам, так и по физико-механическим свойствам. Это обстоятельство достаточно очевидно. Ясно, например, что покрытие антенного отсека и задней части полотна антенны радиолокатора должно быть очень легким. Вместе с тем, к нему не нужно предъявлять жестких требований по стойкости к эрозии. Но такие требования обязательны, в частности, для покрытий, наносимых на передние кромки крыла и канала воздухозаборника, а также на элементы входного устройства силовой установки. Кроме того, у этих покрытий, как показывают электродинамические расчеты и результаты многочисленных экспериментов, должны быть еще и разные радиофизические характеристики. Хорошо известно, что рассеяние электромагнитной волны на больших телах сложной формы определяется, в основном, локальными процессами, происходящими вблизи так называемых центров рассеяния, дающих основной вклад в ЭПР самолета. Примеры таких центров рассеяния – кромки, щели, фрагменты криволинейных поверхностей, отдельные элементы конструкции: воздухозаборник, бортовая антенна, кабина пилота и т.п. Радиопоглощающие или другие специальные (например, экранирующие) покрытия необходимо применять для уменьшения рассеяния от этих центров. Интуитивно ясно, что покрытия для задних и передних кромок могут иметь разные радиофизические характеристики, и для оптимизации рассеяния от всей системы (например, крыла) необходимо подбирать оптимальные значения диэлектрической и магнитной проницаемости покрытий.

В одной статье невозможно осветить огромное число фундаментальных и прикладных проблем, возникающих в ходе выполнения требований по снижению РЛЗ техники. Мы обратим внимание на наиболее важные из них, а также на результаты разработок последнего времени, тем более, что часть вопросов была освещена в работе [5].

СНИЖЕНИЕ ЭПР ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ САМОЛЕТА

Рассмотрим проблему уменьшения ЭПР важнейшего рассеивающего центра самолета – его воздухозаборника (ВЗ) с силовой установкой (СУ). В связи с тем, что отражение от системы воздухозаборник–двигатель дает основной вклад в ЭПР самолета, математическое моделирование процессов рассеяния играет исключительно важную роль. Более того, хорошо известна корреляция частоты характерных флуктуаций эхо-сигнала с некоторыми параметрами компрессора низкого давления (числом лопаток, частотой вращения), само это явление получило название компрессорной модуляции. Соответственно, практическое значение может иметь лишь та модель СУ, которая учитывает наличие в воздухозаборнике сложной лопастной структуры (т.н. крыльчатки). Отметим, что попытки применить приближенные методы, например, физической оптики, для расчета ЭПР СУ могут привести к серьезным погрешностям, в особенности это относится к тем случаям, когда стенки воздушного канала и части нагрузки покрыты поглощающим материалом. Поэтому необходимо использовать трудоемкие, но точные методы, основанные, например, на интегральных уравнениях (ИУ) теории дифракции. К сожалению, учитывая 3-мерность задачи, сложность конструкции и значительные (десятки-сотни длин волн) характерные габариты рассеивателей, самостоятельное использование универсальных строгих методов типа ИУ оказывается невозможным. Даже при использовании известных из литературы экономичных итерационных алгоритмов время решения задачи остается слишком большим. Так, при использовании доступной вычислительной техники максимальные габариты полости ограничиваются несколькими длинами волн, если допустимое время расчета одной диаграммы обратного рассеяния составляет несколько часов. При этом затраты времени и требуемой оперативной памяти в лучшем случае пропорциональны квадрату общей площади поверхности полости (т.е. поверхности, на которой рассчитываются эквивалентные токи). Естественно, использование суперкомпьютеров значительно расширяет возможности расчетов как по типовым алгоритмам, так и с привлечением специализированных методик.

Для проведения расчетов рассеяния электромагнитной волны на объектах реальных размеров в ИТПЭ построена модель ВЗ, основанная на комбинированном использовании нескольких методик. При анализе прохождения волны в воздушном канале объем ВЗ разбивается на две части: волноводную (от входного отверстия до крыльчатки) и нагрузку этого волновода (крыльчатку), рис. 2а,б. В свою очередь, волноводная часть разделяется еще на несколько частей (секций), количество которых зависит от общей длины канала, рис. 2в.

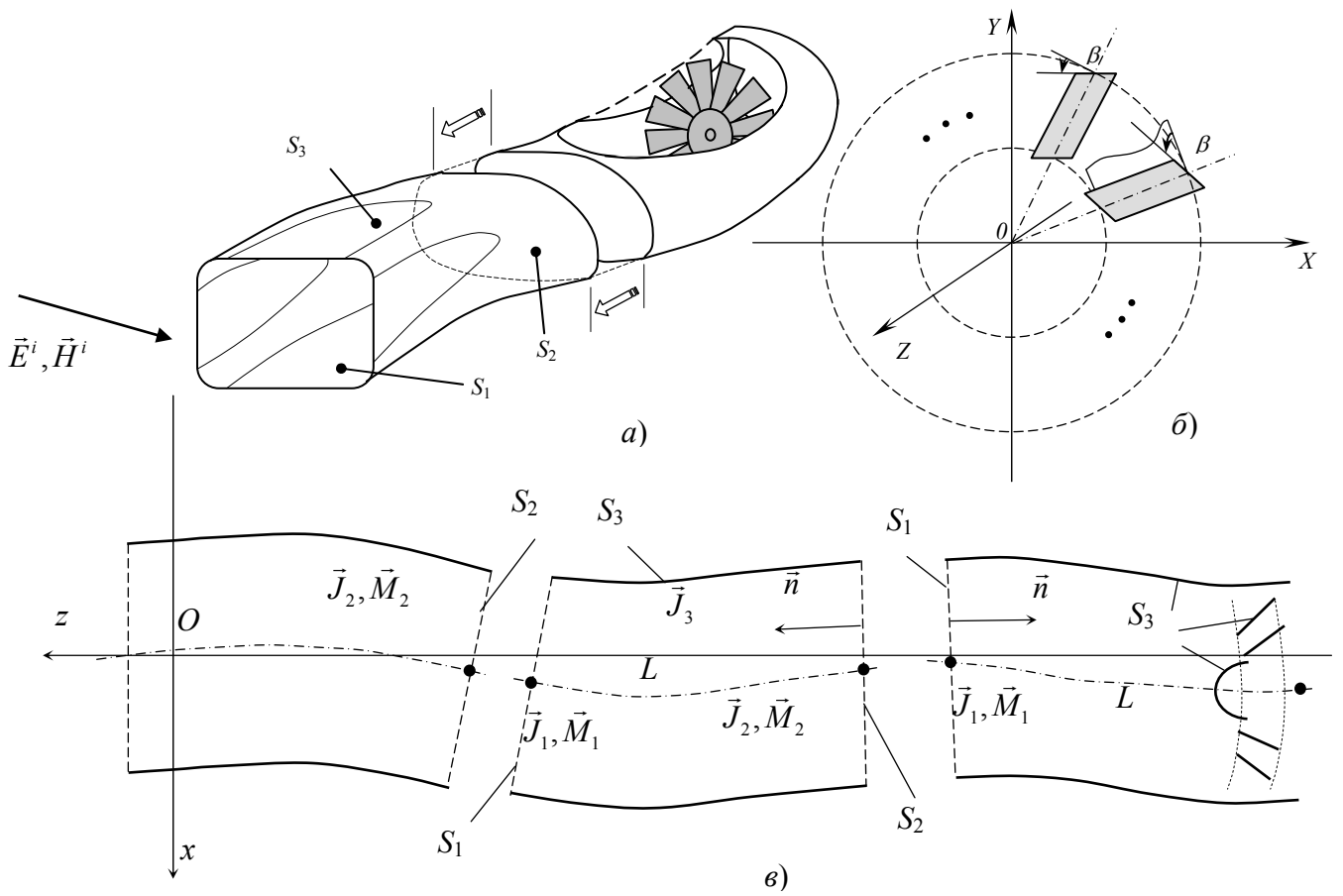


Рис. 2. Модель воздухозаборника с первой ступенью силовой установки

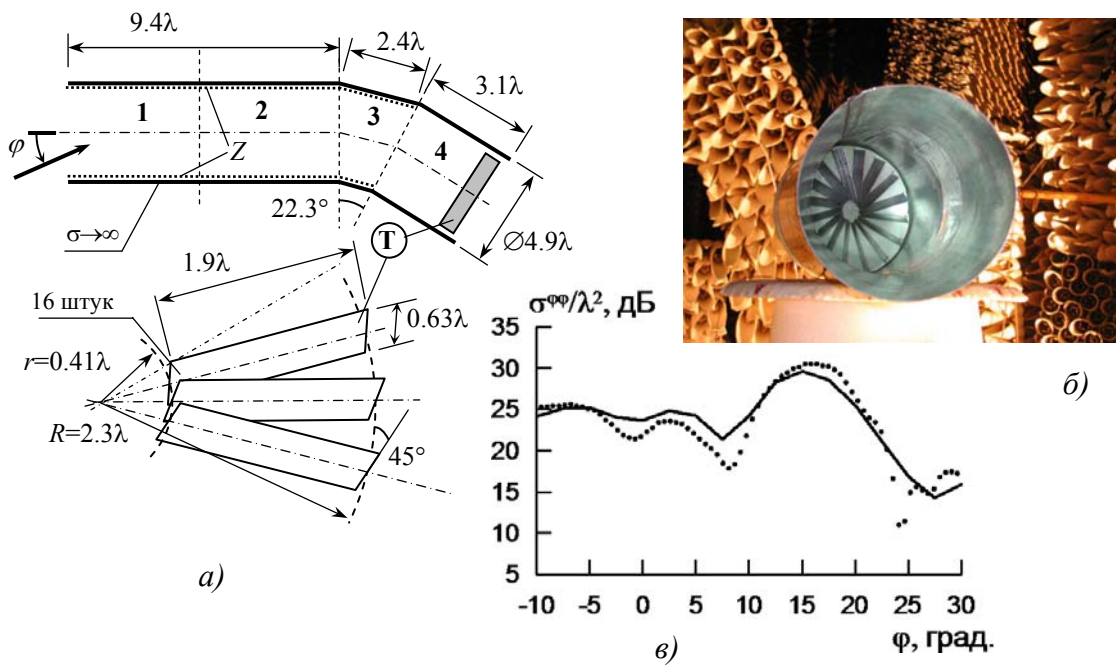


Рис. 3 Эскиз макета воздухозаборника (а), измерения в безэховой камере (б), сравнение с результатами расчетов (в)

В каждой из секций выделяются входная и выходная апертуры, а также боковая поверхность. Далее рассчитываются эквивалентные электрический и магнитный токи на выходной апертуре по ранее определенным токам на входной апертуре. Этот процесс продолжается последовательно от секции к секции вплоть до секции с нагрузкой (крыльчаткой). Расчет рассеяния на секции с нагрузкой производится в следующей последовательности. Сначала, как и при расчете прохождения поля через секцию воздушного канала без нагрузки, в итерационном процессе определяются токи на боковой поверхности полости, причем источником возбуждения являются эквивалентные поверхностные токи на входной апертуре этой секции. Затем строгим методом ИУ решается задача дифракции на крыльчатке, которая возбуждается полями токов, распределенных на входной апертуре и боковой поверхности данной секции. Результат решения этой задачи – распределение поверхностного тока на лопатках. Следующий этап практически повторяет описанный выше расчет прохождения волны через отдельно взятую секцию воздушного канала с той лишь разницей, что источником поля являются теперь не эквивалентные токи на апертуре, а поверхностные токи на лопастях крыльчатки. Как и ранее, в итерационном процессе определяется дополнительная компонента тока на боковой поверхности секции, после чего путем интегрирования токов на боковой поверхности и лопастях крыльчатки находится рассеянное поле на входной апертуре секции с нагрузкой. Эквивалентные электрический и магнитный токи на апертуре – границе раздела секций являются источниками волны, прохождение которой рассматривается от секции к секции по направлению к входному отверстию воздушного канала. Этот расчет происходит аналогично, при этом входная и выходная апертуры каждой секции меняются ролями. Экономия вычислительных ресурсов достигается за счет того, что прохождение падающей и отраженной от нагрузки (вторичной) волн рассматривается для каждой секции в отдельности. Это допустимо на относительно высоких частотах, когда приближение Кирхгофа обеспечивает необходимую точность, и можно пренебречь краевыми эффектами и дополнительным взаимодействием между различными секциями. В результате время расчета почти линейно зависит от длины волноводной части (количества секций).

В рамках описанного алгоритма реализован и учет покрытия, нанесенного на внутренние стенки воздушного канала. Покрытие моделируется путем введения эквивалентного импеданса. Очевидно, что вследствие значительно более сложного взаимодействия электромагнитной волны с диэлектрическим слоем (в том числе – и в импедансном приближении) по сравнению со случаем проводящей поверхности требуется выполнение большего количества расчетов. Поэтому время вычислений возрастает (ориентировочно в 2-3 раза), по ряду причин, в первую очередь – из-за зависимости коэффициента отражения от направления и поляризации падающего поля.

В качестве токов возбуждения входной апертуры S_1 воздухозаборника используются касательные составляющие падающего поля плоской волны (приближение Кирхгофа). Наконец, рассеянное поле во внешнем пространстве

определяется интегрированием по этой же апертуре касательных составляющих вторичной волны, которая распространяется вдоль канала от нагрузки.

Созданная методика расчета позволяет рассчитать ЭПР ВЗ с требуемой точностью даже при его сложной форме (S-образный канал, переменное поперечное сечение). На рис. 3 демонстрируется макет воздухозаборника с изогнутым каналом и нагрузкой (лопатками воздухонаправляющего аппарата или компрессора). Видно, что результаты описанного метода расчета хорошо согласуются с данными эксперимента, проведенного в безэховой камере.

Итак, в настоящее время можно довольно точно оценить ЭПР СУ с нанесенными покрытиями (в принципе, может использоваться несколько типов РПП в одном воздухозаборнике). Однако остается нерешенным вопрос о том, как выбрать покрытие для ВЗ. До сих пор встречается заблуждение, когда конструкторы стремятся применять и применяют покрытие, имеющее минимальный коэффициент отражения по нормали. Однако в том случае, когда ВЗ прямой или почти прямой, пик отражения возникает вблизи его оси за счет отражения электромагнитной волны (ЭМВ) от нагрузки при прямом попадании ЭМВ на неё, а также за счет отражений от поверхности воздушного канала. Таким образом, значительный вклад в ЭПР возникает при падении ЭМВ на стенки под малыми углами относительно ее поверхности. В связи с этим

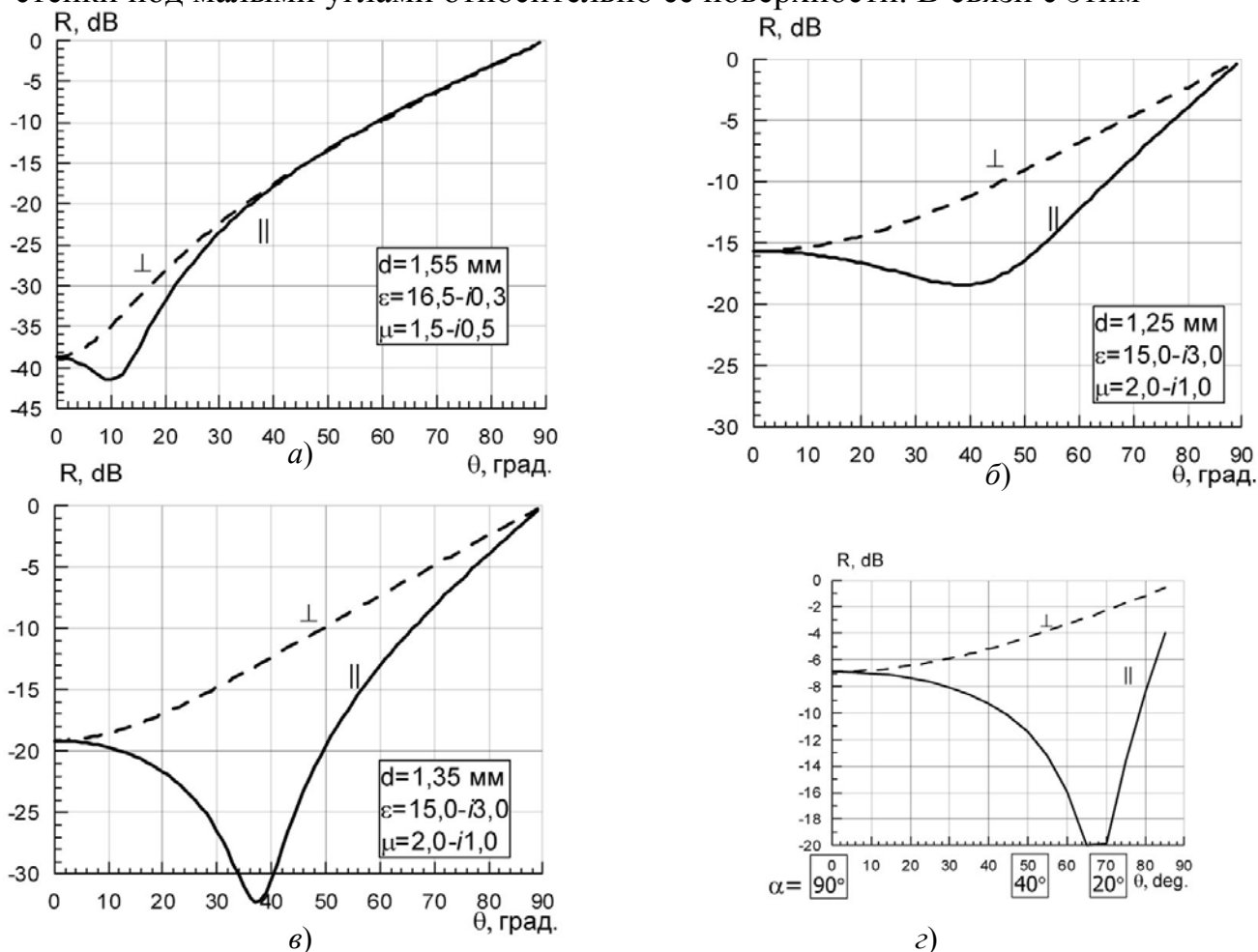


Рис. 4. Угловые зависимости коэффициента отражения различных покрытий

приведем угловые зависимости коэффициентов отражения нескольких покрытий (рис. 4).

Для передней кромки крыла имеет смысл использовать покрытие на рис. 4а. Однако для прямого воздухозаборника с нагрузкой оно будет плохо работать на стенках воздушного канала. Так как основной вклад в ЭПР будет определяться большими углами θ , необходимо выбрать покрытие с углом Брюстера вблизи 70° или более (рис. 4з), а затем необходимо оптимизировать покрытие, наносимое на нагрузку. Пример результата такой оптимизации показан на рис. 5. Видно, что даже для осевых направлений можно уменьшить ЭПР на порядок.

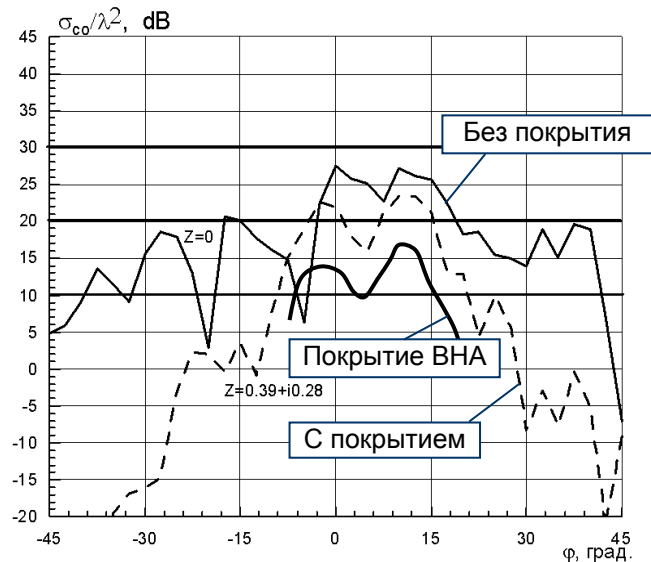


Рис. 5. Угловые зависимости ЭПР воздухозаборника

При интуитивном выборе покрытия на стенках ВЗ, ориентируясь по углу Брюстера, мы, по существу, использовали лучевое приближение. Вместе с тем, известно, что лучевое приближение не всегда обеспечивает нужную точность расчета волновых процессов в воздухозаборнике. Рис. 6, воспроизведенный из [7], демонстрирует картины переноса излучения энергии между двумя плоскостями, полученные в лучевом приближении и в результате точного расчета.

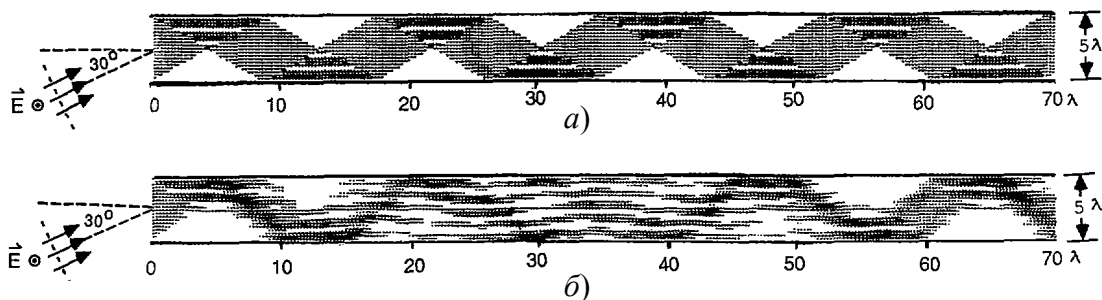


Рис. 6. Перенос энергии между параллельными металлическими плоскостями: лучевое приближение (а) и реальный процесс (б)

Хорошо видно, что уже на расстоянии 20λ от входа в воздухозаборник (λ — длина волны) лучевая картина существенно отличается от реальной. Каким же образом выбрать оптимальные параметры покрытия хотя бы в первом приближении?

И эксперименты, и многочисленные расчеты с использованием описанной модели показали, что выбор покрытия на основе геометрических представлений часто не приводит к оптимальным результатам. Если взять реальные соотношения размеров канала и длины волны, то покрытия с большими значениями угла Брюстера не выявляют

преимуществ перед рядом других РПП, что объясняется сложными дифракционными явлениями в канале.

Лучшие результаты дал выбор параметров покрытия на основе энергетических соображений. Рассмотрим возможную постановку соответствующей модельной двухмерной задачи, рис. 7, которая близка к классической задаче Зоммерфельда об излучении точечного источника, расположенного над полупространством.

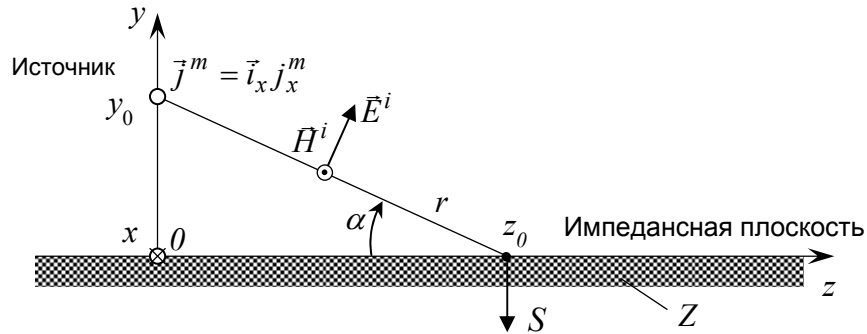


Рис. 7. Постановка задачи возбуждения импедансной плоскости нитевидным источником

Пусть над плоскостью $y = 0$ с заданным постоянным поверхностным импедансом Z находится сосредоточенный источник, а именно, нить магнитного тока с единственной x -компонентой, т.е. вектор \vec{E}^i падающего поля имеет перпендикулярную по отношению к импедансной плоскости компоненту, а вектор \vec{H}^i параллелен ей. Требуется определить значение импеданса, при котором обеспечивается максимальная плотность потока мощности, переносимой через плоскость $y = 0$ в заданной точке z_0 либо через заданный участок этой плоскости.

Строгое решение граничной задачи дает следующее выражение для касательной компоненты магнитного поля H_x и вещественной части вектора Пойнтинга \vec{S} в направлении нормали $-\vec{i}_y$ при $y = 0$:

$$H_x = -\frac{i\omega\varepsilon_0}{2\pi} I_0 \int_0^\infty \frac{2 \cos(\xi z)}{q + ikZ_w} \exp(-qy_0) d\xi; \quad \text{Re}(S) = \frac{1}{2} \text{Re}(Z_w) |H_x|^2,$$

где $q = \sqrt{\xi^2 - k^2}$, $k = 2\pi/\lambda$, $Z_w = Z/W_0$, $W_0 = 120\pi$ (Ом), λ – длина волны.

Для иллюстрации рассмотрим случай размещения нити тока на высоте около половины длины волны, $ky_0 = 3$, $k = 2\pi/\lambda$. На рис. 9 представлены результаты расчета плотности потока мощности через плоскость $y = 0$ в зависимости от координаты точки наблюдения z_0 для трех случаев. Кривая 1 соответствует отсутствию импедансной плоскости, т.е. размещению нити в свободном пространстве и распространению волны через границу $y = 0$ без отражений. Кривая 2 построена для случая, когда импеданс плоскости равен характеристическому сопротивлению свободного пространства $Z = W_0$.

Заметим, что именно при таком значении импеданса обеспечивается полное прохождение («поглощение») плоской волны, нормально падающей на плоскость. При малых расстояниях от нити (больших углах α , см. рис. 7) кривые 1 и 2 близки друг к другу, однако с увеличением z_0 (т.е. при небольших, «скользящих» углах α) в случае $Z = W_0$ плотность потока энергии через плоскость $y = 0$ оказывается существенно меньшей, чем для случая свободного пространства (см. рис. 8б).

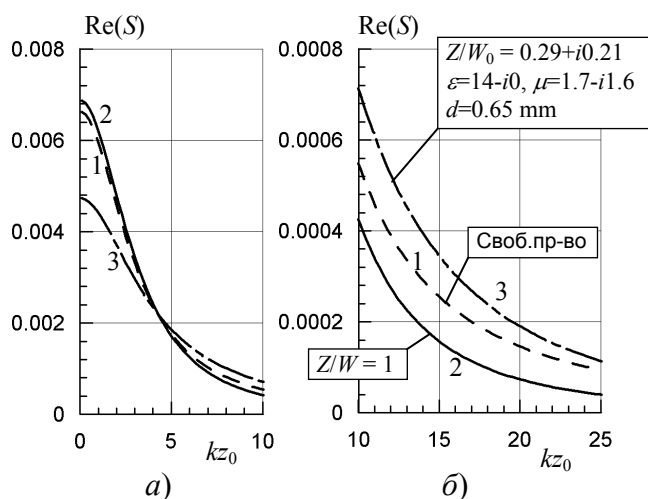


Рис. 8. Плотность потока мощности, переносимой через плоскость

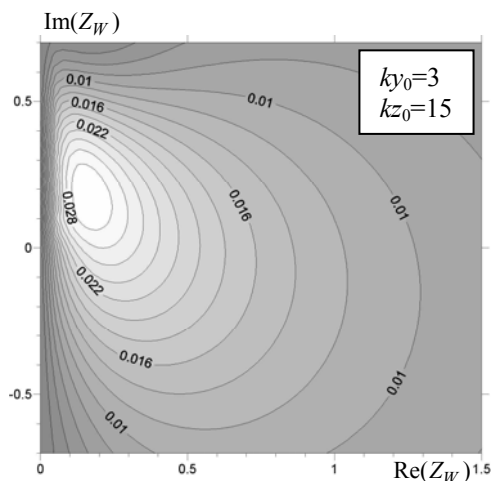


Рис. 9. Поиск оптимального значения импеданса

Можно, однако, выбрать такое радиопоглощающее покрытие, которое обеспечит повышенный поток мощности через границу раздела и, соответственно, ослабление энергии волны при скользящем ее падении. Например, если на металлическую плоскость нанести покрытие с диэлектрической и магнитной проницаемостями $\epsilon \approx 14$, $\mu = 1.7 - i1.6$ слоем толщиной $d = 0.65$ мм, то при длине волны $\lambda = 3$ см его эквивалентный импеданс будет слабо зависеть от угла падения плоской волны и окажется равным $Z/W_0 = 0.29 + i0.21$. Кривая 3, построенная для этого случая, показывает, что на широком интервале значений z_0 (при малых углах α , рис. 8б) через границу покрытия переносится существенно большая энергия волны по сравнению со случаями «согласованного по нормали» (кривая 2) и даже «идеально неотражающего» покрытия (т.е. свободного пространства, кривая 1). Покрытие с близкими свойствами целесообразно наносить на стенки воздушного канала для уменьшения ЭПР воздухозаборника соответствующих размеров при осевых ракурсах его облучения.

Варьируя значения импеданса при заданных параметрах задачи (например, y_0 и z_0), можно определить его оптимальное значение, при котором обеспечивается максимальная плотность потока мощности (см. пример, представленный на рис. 9). Практика расчетов показала, что при использовании однородных покрытий наилучшие результаты должны достигаться при индуктивном характере поверхностного импеданса, если $\text{Re}(Z/W_0) \approx 0.2 \dots 0.5$ и $\text{Im}(Z/W_0) \approx 0.1 \dots 0.3$. Эти выводы согласуются с данными из литературы и

физическими представлениями о том, что при индуктивном импедансе обеспечиваются лучшие условия для поглощения волны, в частности, за счет возбуждения поверхностных волн и эффекта большей концентрации энергии волны у стенок канала. Наконец, расчеты на модели сложного воздухозаборника для реальных конфигураций показали явное преимущество покрытий, выбранных описанным выше способом.

Естественно теперь поставить вопросы о том, каким должен быть свойства (поверхностный импеданс) плоскости, чтобы она могла поглотить максимальную долю энергии, излучаемой сосредоточенным источником (например, нитью тока), какова эта доля и как реализовать нужный импеданс. Отметим, что в случае отсутствия плоскости (в свободном пространстве) из-за симметрии диаграммы излучения нити в верхнее и нижнее полупространства излучается одинаковая мощность, и через плоскость $y=0$ переносится ровно половина излученной энергии. Наши исследования показали, что можно построить даже такую пассивную систему, которая обеспечивает *полную* компенсацию поля источника в верхнем полупространстве и, соответственно, передачу всей энергии излучения в нижнее полупространство. Для этого нужно использовать материалы с уникальными свойствами, обусловленными их внутренней структурой, так называемые метаматериалы, изучению которых в ИТПЭ РАН уделяется большое внимание. Рассмотрим пример реализации такой системы.

Пусть нитевидный источник с единственной x -компонентой электрического тока находится в точке y_0 над проводящей плоскостью $y=0$, рис. 10. Известно, что вторичное поле в этом случае можно интерпретировать как поле зеркального источника, причем токи в нити и ее изображении равны по амплитуде, но противофазны. Другими словами, при отражении от металла фаза волны меняется на противоположную. Разместим между источником и проводящей плоскостью фокусирующую плоскую пластину (линзу Веселаго [8]) толщиной $d = y_0/2$ из метаматериала с $\epsilon \approx -1$, $\mu \approx -1$ на высоте h так, что $0 < h < y_0/2$. При этом фокальная точка и ее зеркальное изображение

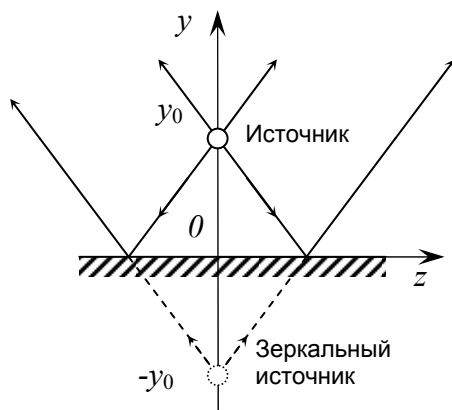


Рис. 10. Лучевая схема формирования поля источника над проводящей плоскостью

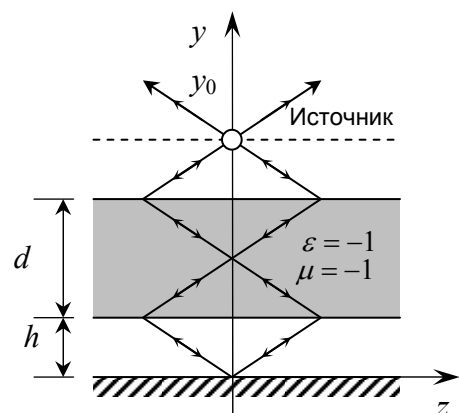


Рис. 11. Лучевая схема компенсации полей в верхнем полупространстве

совместятся непосредственно на поверхности проводящей плоскости (см., например, лучевую схему на рис. 11). Если вычислить набег фаз лучей с учетом того, что фазовая скорость волны в пластине отрицательна, а при отражении от металла фаза поля изменяется на противоположную, получим, что в области $y > y_0$ происходит взаимная компенсация первичного и вторичного полей. В идеальном случае, когда $\varepsilon \rightarrow -1$, $\mu \rightarrow -1$, полное поле в верхнем полупространстве стремится к нулю.

Строгое решение соответствующей граничной задачи приводит к такому же заключению. В качестве иллюстрации рассмотрим рис. 12 и рис. 13, где изображены абсолютные значения поля в окрестности источника (в плоскости, перпендикулярной нити электрического тока). На рис. 12 показаны изолинии, а на рис. 13 дано 3-мерное изображение функции распределения поля.

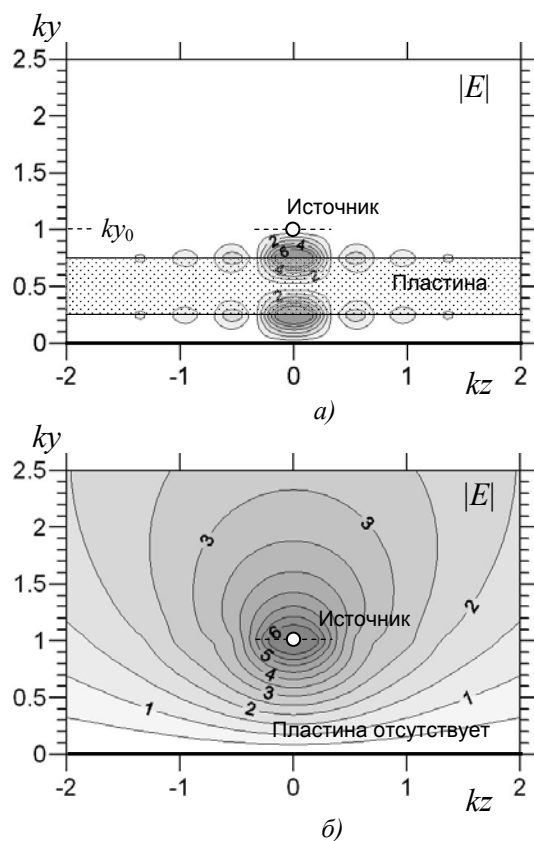


Рис. 12. Поле в окрестности источника (карта изолиний)

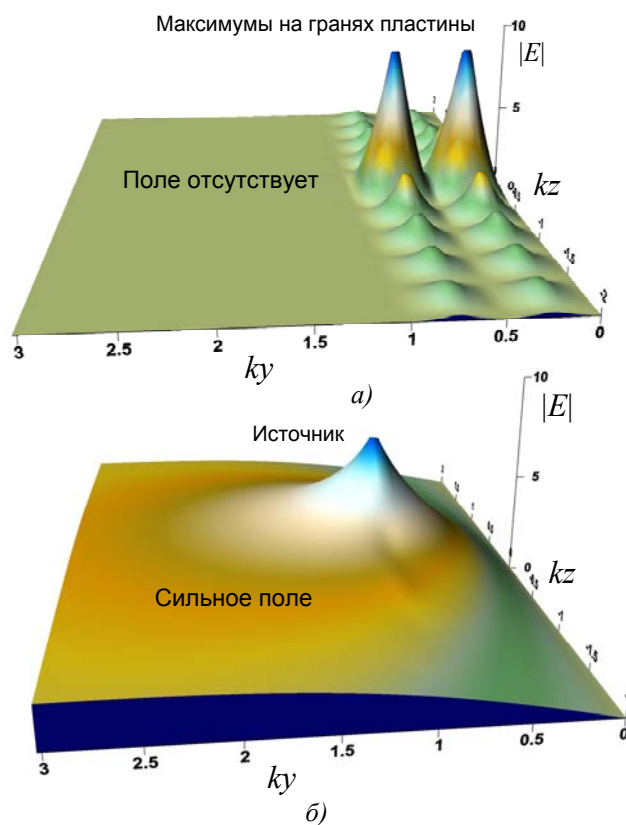


Рис. 13 Поле в окрестности источника (рельеф поверхности)

Верхние рисунки (а) отображают результаты, полученные при $ky_0 = 1$, $d = 2h = y_0/2$, $\varepsilon = \mu = -1 - i0.001$ (зависимость от времени выбрана в виде $\exp(i\omega t)$), геометрия соответствует рис. 11. Нижние рисунки (б) выполнены для случая отсутствия пластины, когда $\varepsilon = \mu = 1$, они даны для сравнения. Видно, что при наличии пластины из метаматериала поле в области

$y > y_0$ практически равно нулю, в отличие от второго случая, когда поле нити над плоскостью ничем не ослабляется. На основе использования этого эффекта могут быть разработаны (и нами уже созданы экспериментальные образцы) покрытия с уникальными свойствами, в частности, для работы в широком угловом диапазоне.

Хорошо известно [9], что наряду с силовой установкой, антенна бортовой радиолокационной станции (БРЛС) является еще одним из основных источников вторичного (рассеянного) поля самолета в передней полусфере.

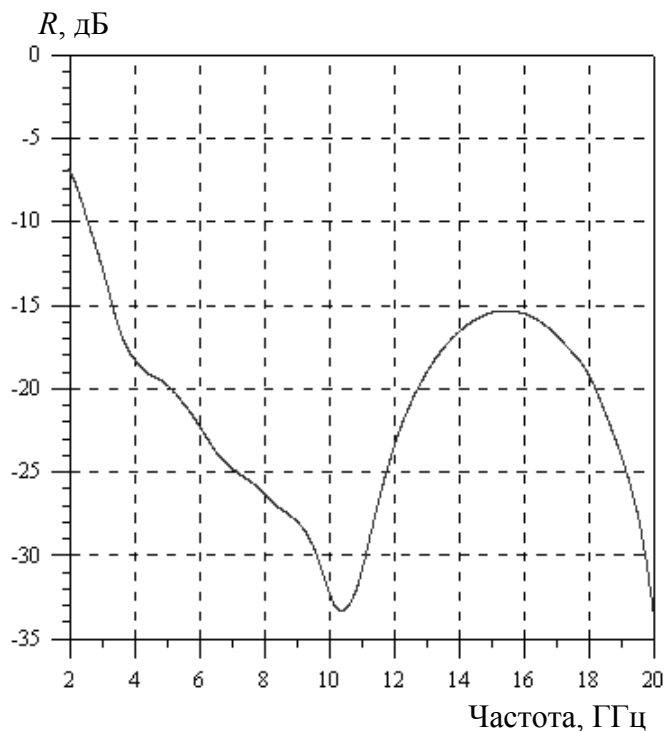
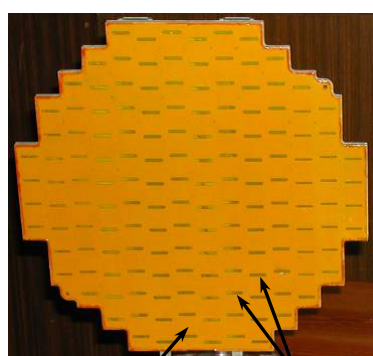
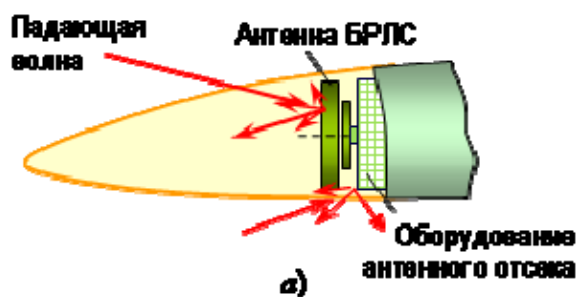


Рис. 14. Коэффициент отражения покрытия для маскировки антенного отсека



Проводящая поверхность (b) Щели

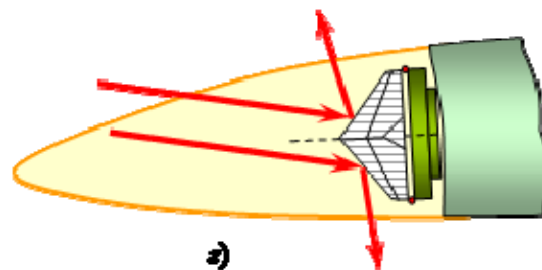
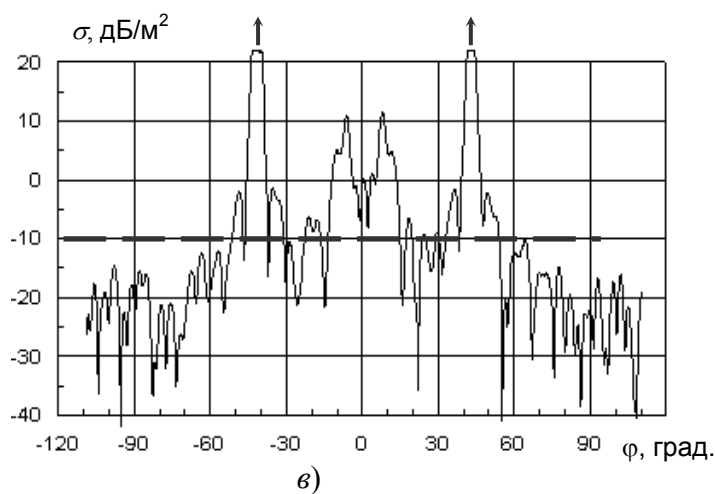


Рис. 15. Щелевая антенная решетка и ее маскировка

Демаскирование антенного отсека происходит за счет рассеяния падающей волны на металлических элементах оборудования, установленного в отсеке, и рассеяния на антенном полотне. Оборудование (электронные блоки и механизмы) можно укрыть обычными радиопоглощающими материалами. В

ачестве примера на рис. 14 приведена типичная частотная зависимость коэффициента отражения покрытия, разработанного в ИТПЭ. Это – облегченное магнетодиэлектрическое покрытие на основе пенополиуретанов для маскировки задней части антенного отсека БРЛС.

Гораздо сложнее снизить заметность собственно антенны. Типовая конструкция щелевой антенной решетки показана на рис. 15. Основной вклад такой антенны в рассеянное поле определяется зеркальным отражением волны от металлической поверхности диска (в направлениях, близким к нормали к его плоскости), а также дифракцией на системе щелевых излучателей.

При типовых геометрических параметрах антенного полотна дифракция на щелях проявляется особенно заметно при отклонении направления облучения/наблюдения на угол $30^\circ..60^\circ$ от нормали, см. рис. 15в. В указанных секторах значение ЭПР может достигать десятков и даже сотен квадратных метров, тогда как для современного малозаметного летательного аппарата допустимым может считаться уровень не более нескольких десятых долей квадратного метра в сантиметровом диапазоне длин волн.

В целях противорадиолокационной маскировки антенн, а также для улучшения некоторых параметров излучающих систем (например, показателей электромагнитной совместимости) могут применяться специальные экраны, встраиваемые в обтекатель или устанавливаемые на антенну. Снижение ЭПР достигается за счет того, что особая форма экрана антенны обеспечивает меньшее рассеяние в обратном направлении по сравнению с незащищенной антенной (рис. 15г). Такие экраны могут быть изготовлены из тонких структурированных материалов. В частном случае основой экрана может служить частотно-избирательная поверхность (ЧИП), т.е. перфорированная электропроводящая фольга, сетка с ячейками специальной формы или же электронно- или фотоуправляемая пленка. Для маскировки антенн можно использовать управляемые и неуправляемые экраны.

При использовании *неуправляемых* экранов возможность работы антенны в штатном режиме сохраняется, если экран практически прозрачен в рабочей полосе радара. Защитные функции обеспечиваются лишь вне полосы пропускания экрана. К достоинствам неуправляемых экранов можно отнести дешевизну, простоту, минимальные вес и толщину стенок экрана, высокую стойкость к механическим и электрическим перегрузкам.

Управляемые экраны могут обеспечить выполнение очень широкого спектра функций, в том числе маскировку антенны в ее рабочем диапазоне частот, если БРЛС не находится в активном режиме. Пример технического решения такого рода [10] - нанесение на внутреннюю поверхность антенного обтекателя фоточувствительной пленки, сопротивление которой изменялось бы под воздействием управляющего оптического облучения. В идеале пленка должна переводиться из практически проводящего состояния (режим экранирования) в состояние с очень высоким сопротивлением (режим «отсутствия» экрана, работа БРЛС). Реальный диапазон изменения сопротивления должен быть порядка от 30 Ом до 300 кОм на квадрат поверхности. К сожалению, существуют практические трудности по созданию

пленки с требуемым диапазоном изменения поверхностного сопротивления. Эти трудности могут быть сглажены, если пленку использовать совместно с некоторыми металлическими структурами или включениями.

Альтернативным техническим решением может служить экран, основой которого является ЧИП с системой периодических отверстий определенной формы, настроенных так, чтобы пропускать электромагнитные волны в узкой полосе собственных частот локатора [11, 12]. Для электромагнитных волн других частот такой экран работает как отражающий. Вводя в эти отверстия (открытые резонаторы) управляющие полупроводниковые системы (например, с электронным или фотоуправлением), можно по желанию делать его непрозрачным и в полосе частот локатора. В ИТПЭ изучены и систематизированы достоинства и недостатки некоторых перспективных конструкций экранов (в том числе и упоминавшихся выше). На данный момент представляется, что по совокупности характеристик экраны на основе управляемых ЧИП предпочтительнее других конструкций.

Реальный экран антенны имеет довольно сложную конфигурацию, однако все его характерные размеры гораздо больше длины волны. Исходя из назначения экрана, конструкция его поверхности выбирается так, чтобы исключить возможность возникновения незатухающих поверхностных волн. Поэтому можно рассчитывать прохождение волны через экран, используя приближение физической оптики и соответствующие коэффициенты прохождения и отражения для отдельных зон (точек) экрана. Эти коэффициенты можно найти из численного решения граничной задачи возбуждения бесконечной плоской ЧИП, на которую падает волна под теми же углами и с той же поляризацией, что и на плоскость, касательную к экрану в данной точке. Таким образом, возможно комбинированное использование высокочастотного и строгого подходов для обеспечения достаточной вычислительной эффективности расчетной модели.

В ИТПЭ разработаны электродинамические модели, составлены вычислительные программы, позволяющие оптимизировать геометрические параметры плоских ЧИП с учетом наличия управляющих элементов (УЭ), а также рассчитать свойства экранов с такими ЧИП. Проектирование управляемых экранов приводит к компромиссным решениям. Так, например, при увеличении собственной добротности элемента ЧИП (за счет выбора его формы или увеличения периода структуры) снижаются требования к управляющим элементам, но ухудшаются угловые и частотные характеристики структуры. Собственная емкость УЭ с электронным управлением (*p-i-n*-диода) может также существенно повлиять на частотные и иные характеристики ЧИП.

Исследования коэффициента прохождения щелевых экранов показали, что неравномерность угловых характеристик проявляется в наибольшей степени в плоскости, содержащей щели. Обычно влияние экрана заметно уже при приближении к углам порядка 45 град.. Этот результат показывает, что экран для антенны лучше конструировать как отдельное устройство (см. [рис. 19г](#)) со специальной криволинейной поверхностью (например, типа

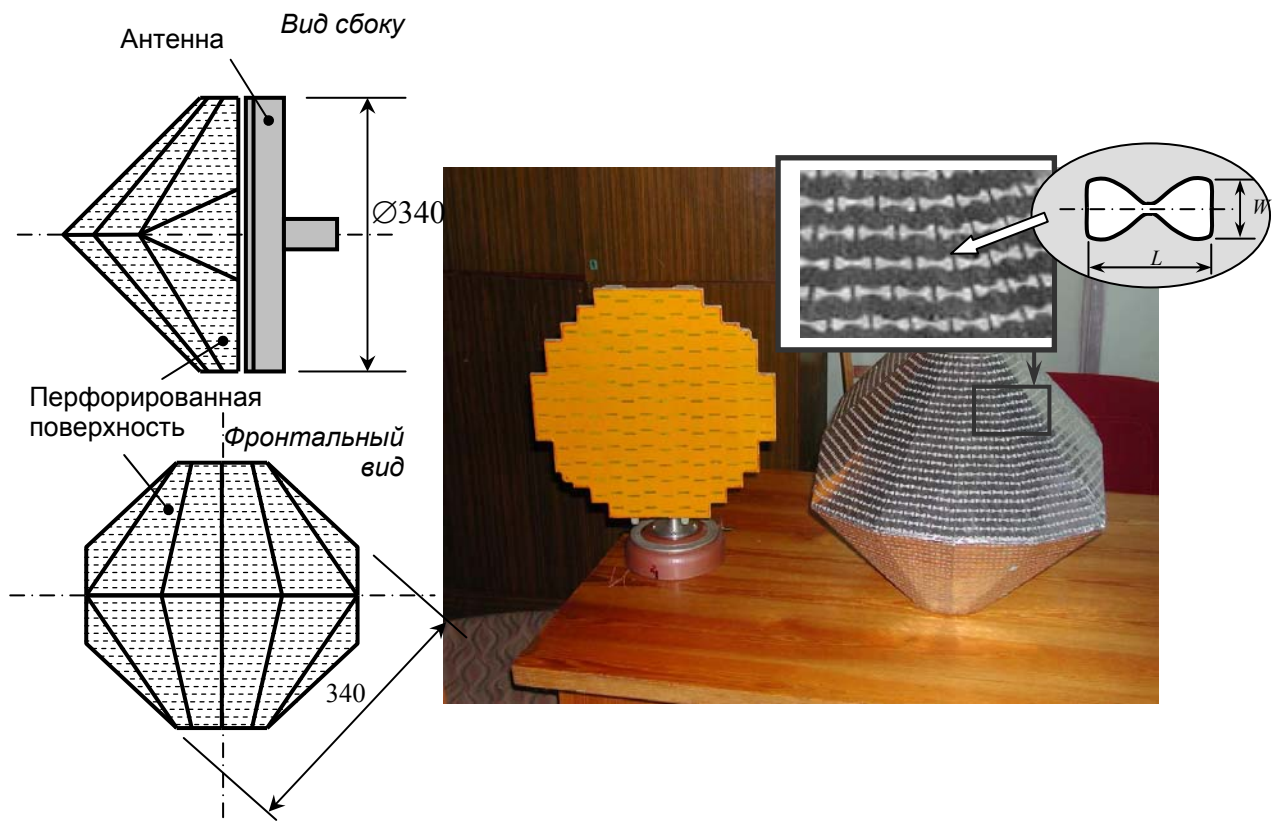


Рис. 16. Щелевая антенная решетка и экран на основе ЧИП

биконуса), чтобы обеспечить оптимальные углы облучения ЧИП – в отличие от общепринятой концепции интегрирования экрана в состав обтекателя БРЛС [11].

Одна из экспериментальных конструкций макета экрана для маскировки волноводно-щелевой плоской ФАР диаметром 0,34 м изображена на рис. 16. Рассмотренный ниже пример позволяет составить представление о возможной степени снижения ЭПР антенны и искажениях ее диаграммы направленности за счет использования экрана.

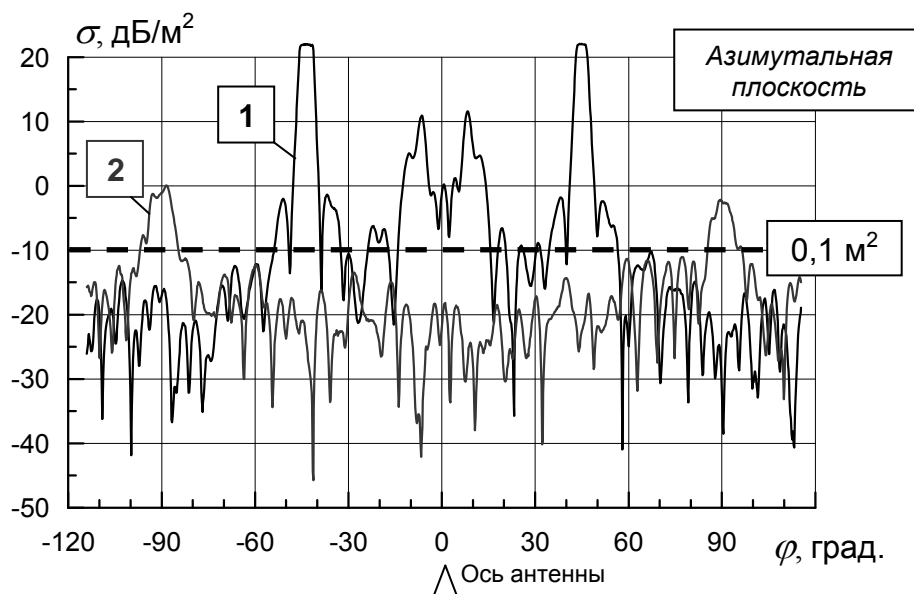


Рис. 17. Диаграммы ЭПР антенны без экрана (1) и с экраном (2)

Результаты испытаний макета показали, что в режиме защиты обеспечивается очень низкое (менее 0.1 м^2) значение ЭПР макетной системы «антенна+экран» в широких частотном и угловом диапазонах. Типовое значение потерь в основном лепестке диаграммы направленности составило 0,2-0,3 дБ. Ухудшение других параметров антенной системы (уровня боковых лепестков, ошибки пеленга и т.п.) также не превысило величин, характерных для носовых остроконечных обтекателей. Пример измеренной диаграммы ЭПР антенны с этим экраном приведен на рис. 17.

Схемы электронного управления переключаемыми диодами и способы включения управляемых фоточувствительных структур были также отработаны на макетах. Некоторые из них представлены ниже. На рис. 18 показана фотоуправляемая ЧИП с дискретными УЭ, а на рис. 19 представлены макеты электронно-управляемых ЧИП, где в качестве УЭ использовались *p-i-n*-диоды. Исследования показали, что вполне реально добиться вносимого затухания не менее 10-20 дБ (экран – в «закрытом» состоянии) при начальных потерях менее 0.5 дБ (экран – в «открытом» состоянии). Широкополосность и угловые характеристики управляемых экранов во многом определяются свойствами конкретных УЭ.

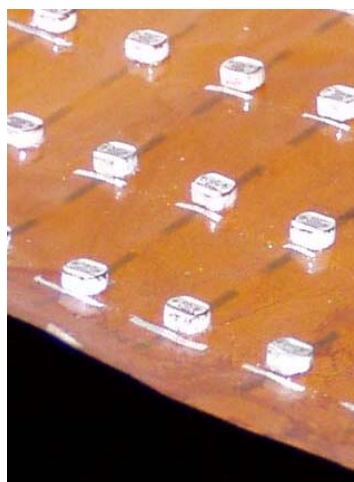


Рис. 18. Фотоуправляемая ЧИП

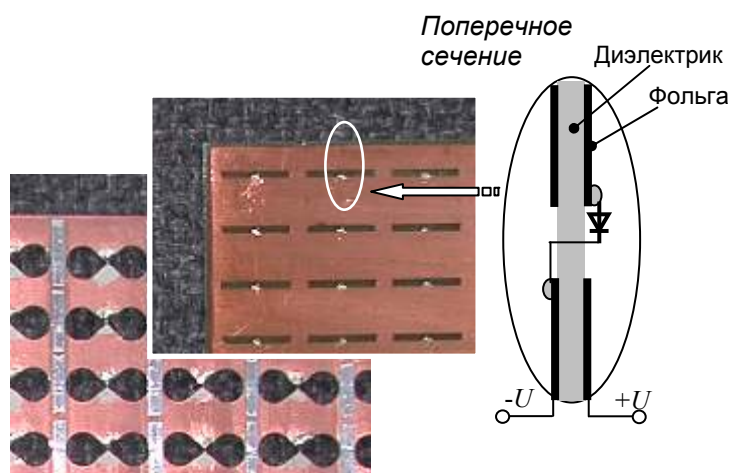


Рис. 19. Электронно-управляемые ЧИП

Результаты измерений характеристик управляемых ЧИП, а также анализ расчетов позволили сделать вывод, что по совокупности параметров в настоящий момент наиболее перспективными выглядят УЭ на основе переключаемых *p-i-n*-диодов. При этом к диодам предъявляется ряд требований: минимальная собственная емкость (для ряда приложений - не более 0,03-0,04 пФ), требуемая электрическая прочность и т.д. Во многих практических случаях серийно выпускаемые *p-i-n*-диоды удовлетворяют необходимым требованиям.

В зависимости от конкретной антенны, можно использовать как описанные выше конструкции, так и технологию, основанную на

использовании плазменных экранов [5]. Такой экран может монтироваться внутри обтекателя таким же образом, как и частотно-селективный экран. Однако его принцип действия несколько иной. В выключенном состоянии экран является прозрачным на всех частотах. При подаче на экран напряжения в нем зажигается низкотемпературная столкновительная плазма, в результате излучение частично отражается от экрана в безопасных направлениях, а частично поглощается в экране. Экран эффективен для электромагнитного излучения всех частот, меньше плазменной. Значение плазменной частоты в таких системах может быть очень большим. Многолетние исследования по изучению процессов, протекающих в низкотемпературной плазме, позволили найти оптимальные параметры как состава газов, образующих плазму, так и оптимизировать высокоскоростную систему генерации плазмы, необходимую для реакции на быстроменяющуюся внешнюю обстановку. Проведенные летные испытания демонстрируют высокую эффективность предложенных решений уменьшения радиолокационной заметности антенного отсека.

Вообще, плазменные технологии широко применяются для обеспечения малой РЛЗ. В частности, хорошо известна плазменно-вакуумная технология создания рассеивающего покрытия на фонаре кабины пилота. Кабина пилота представляет собой большую полость, поскольку обычное остекление откидного фонаря является прозрачным для электромагнитных волн. При локации из верхней полусферы (относительно плоскости самолета) полость кабины вносит значительный вклад в ЭПР. Если нанести тонкий слой металла на остекление кабины, то значение ЭПР кабины, усредненное по некоторому небольшому сектору углов наблюдателя, значительно уменьшается за счет экранирования полости и отражения зондирующего сигнала в безопасные направления. При этом металлизация не должна ухудшить оптические свойства остекления кабины, к которым предъявляются исключительно жесткие требования. Разработанные в ИТПЭ технологии нанесения сложных многослойных покрытий на фонарь кабины пилота с толщиной слоев порядка десятков нанометров (островковые металлические пленки, чередующиеся с полимерными слоями [5]) имеют необходимые характеристики и удовлетворяют ряду других требований по селекции инфракрасного излучения, физико-механическим свойствам и т.д. Отметим, что решение названных задач было реализовано и для сугубо гражданских целей. Соответствующие принципиальные и технологические решения были предложены и запатентованы ИТПЭ для создания так называемых энергосберегающих стекол в индустриальном строительстве. За рубежом имеется мощная индустрия производства таких стекол, в России же массовое производство, как правило, базируется на импортном оборудовании.

РАЗРАБОТКА РПП

В связи с тем, что в подавляющем большинстве покрытий используются магнитные наполнители, принципиальным вопросом является достижение максимально высоких значений магнитной проницаемости, наряду с соответствующей частотной дисперсией её действительной μ' и мнимой μ'' частей. Как хорошо известно, в течение многих лет во всем мире в качестве магнитного наполнителя широко применялось карбонильное железо. На рис. 20 показано поведение μ' и μ'' РПП, содержащего в своем составе 37 % порошка карбонильного железа Р-20 с характерным размером частиц $\sim 2\div 3$ мкм. В результате исследований последних лет в ИТПЭ РАН разработан наполнитель КЖ-2 со значительно лучшими магнитными свойствами (см. рис. 20). Это важно, поскольку увеличение магнитной проницаемости покрытия позволяет значительно снизить его толщину и вес, или же принципиально улучшить его радиофизические свойства.

Для создания новых наполнителей в ИТПЭ РАН была разработана и введена в действие технологическая линия (рис. 21), позволяющая обеспечить серийное производство магнитных наполнителей с улучшенными и, главное, стабильными магнитными

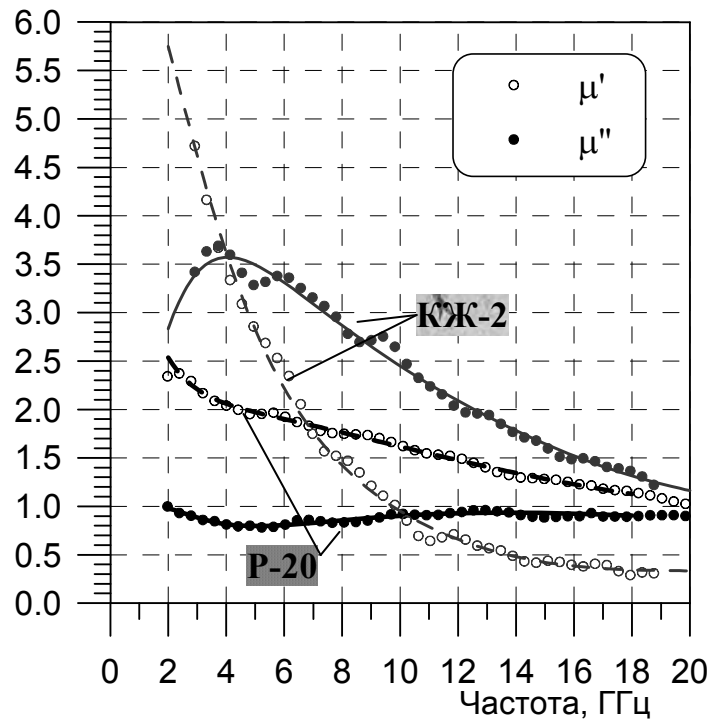


Рис. 20. Частотная дисперсия действительной и мнимой частей магнитной проницаемости наполнителей типов Р-20 и КЖ-2



Рис. 21. Технологическая линия для производства магнитного наполнителя РПП

свойствами в СВЧ диапазоне. На основе таких наполнителей была разработана серия двухкомпонентных радиопоглощающих полимерных компаундов, используемых для изготовления различных типов РПП методом лакокрасочного напыления и отвечающих всем условиям эксплуатации на планере самолетов.

Стабилизация радиофизических параметров новых магнитных наполнителей достигается за счет многостадийного процесса обработки исходного сырья, позволяющего целенаправленно изменять как магнитные, так и диэлектрические свойства наполнителей. Проведение мониторинга СВЧ параметров наполнителей непосредственно в процессе производства позволяет надежно управлять конечным результатом. Варьируя технологию изготовления компаундов, можно получать слои РПП как с очень высокими, так и с низкими значениями диэлектрической проницаемости. Модификация исходных магнитных наполнителей путем добавления специальных реологических добавок наноразмерного уровня приводит к экстремально низким диэлектрическим потерям и низкой диэлектрической проницаемости покрытий на их основе (тангенс диэлектрических потерь менее 0,01) при сохранении повышенных значений магнитной проницаемости (тангенс магнитных потерь порядка единицы).

На рис. 22 представлен пример экспериментальной зависимости коэффициента отражения однослойного РПП, разработанного на основе такого наполнителя с низкими диэлектрическими потерями. РПП такого типа является достаточно эффективным для снижения ЭПР зеркальных точек в 3-см диапазоне длин волн.

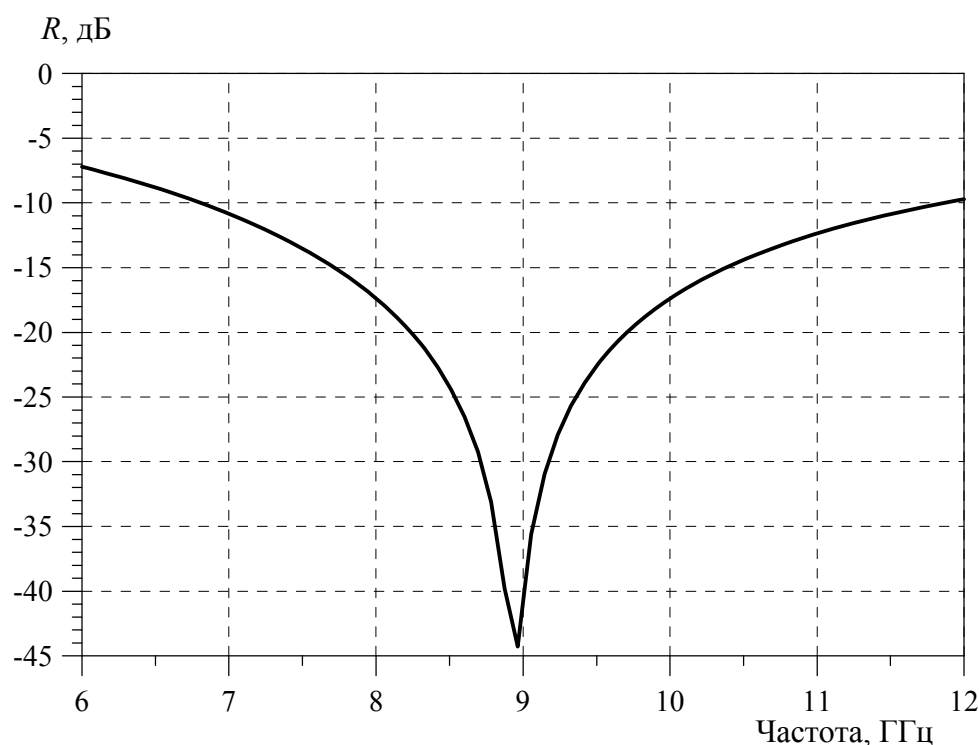


Рис. 22. Частотная зависимость коэффициента отражения РПП

Варьирование режимов обработки магнитных наполнителей позволяет управлять не только значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей композитов, но и ходом их частотной дисперсии. При этом можно получать радиопоглощающие материалы для широкого диапазона частот, с учетом особенностей их работы на конкретных элементах конструкции. Для примера на рис. 23 представлена диаграмма обратного рассеяния при частоте 3 ГГц для вертикальной поляризации волны макета задней кромки крыла с одним из таких покрытий, нанесенных со специальным профилем с максимальной толщиной не более 2 мм.

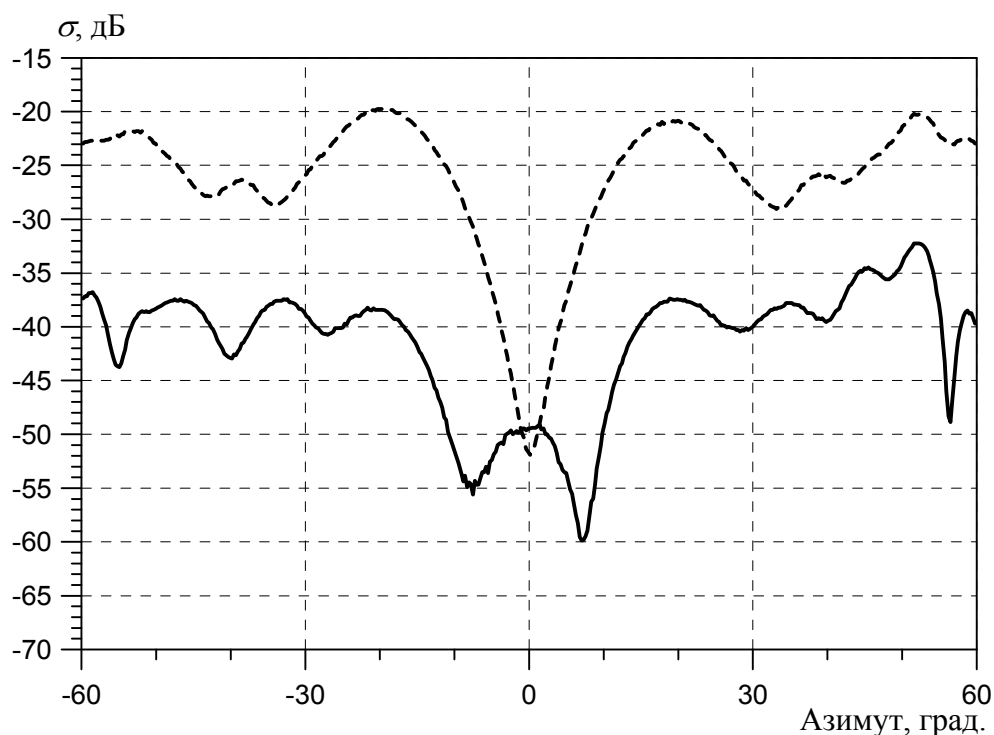


Рис. 23. Снижение ЭПР задней кромки крыла при нанесении на нее РПП

Здесь угол 0° соответствует оси самолета. Измеренная эффективность снижения ЭПР задней кромки в 3 см диапазоне длин волн имеет примерно тот же уровень. На основе разработанного наполнителя созданы РПП, применяемые как при серийном производстве самолетов, так и для перспективных летательных аппаратов. Безусловно, создаваемые РПП удовлетворяют требованиям по стойкости к целому комплексу внешних воздействий: температурным, климатическим, эрозионным, акустическим, вибрационным, контактам с эксплуатационными жидкостями, перепадам давления, механическим воздействиям при обслуживании.

Не менее сложной является задача обеспечения надежной адгезии РПП к обшивкам самолета, выполненным из различных материалов и подвергнутых разнообразной поверхностной обработке. На одном самолете в зону нанесения РПП попадают алюминиевые сплавы с различными видами анодирования и без анодной защиты, стали, титановые сплавы, углепластики, стеклопластики. Необходимо добиться такого баланса адгезионной и когезионной прочностей, а также жесткости покрытия, при которых становится невозможным отслоение

материала без его разрушения. При этом покрытие не должно растрескиваться при допустимых изгибных колебаниях обшивки во всем эксплуатационном диапазоне температур и частот колебаний. Соблюдение этого принципа позволяет избежать отслоения покрытия большими кусками, которые могут повредить конструкции самолета или двигатель. Условно этот принцип можно назвать «адгезия выше когезии».

Вместе с тенденцией удорожания самолетов растут и требования к ресурсам и срокам службы всех систем и агрегатов. Это относится и к системам покрытий, используемым на самолетах, так как стоимость оснащения самолета этими системами достаточно высока. Мы говорим именно о системе покрытий, так как система РПП должна не только не ухудшать условия работы обшивок, но и выполнять задачи по защите обшивок самолета от неблагоприятных факторов. Например, защищать от коррозии, устранять течи топлива и жидкостей гидросистем, сглаживать аэродинамические поверхности, демпфировать колебания обшивок и элементов двигателей, служить теплозащитой. Как правило, главный враг покрытия находится внутри него. В большинстве современных покрытий присутствуют мелкодисперсные порошки металлов и их сплавов, например, железа, кобальта, никеля. Это металлы переменной валентности, ионы которых в малых концентрациях повышают термостабильность полимерных связующих. С другой стороны, наличие в РПП наполнителей на основе железа в высоких концентрациях (до 45% по объему) приводит к ускорению процессов деструкции большинства полимеров. Для устранения последствий этих недостатков при получении покрытий с высоким ресурсом требуется модификация наполнителей и существующих полимеров, а для решения новых задач – синтез связующих, стойких в контакте с широким спектром высокоактивных наполнителей.

Реализовать свойства современных покрытий возможно только при строгом соблюдении технологических режимов и допусков при их нанесении. Толщина слоя, как правило, не должна отклоняться от заданной более чем на $0,05 \div 0,1$ мм. Так же высоки требования к точности исполнения переходов к зонам без покрытий или между зонами различных покрытий. В жестких рамках должны находиться требования по температуре и влажности в цехах, где проводится нанесение покрытий. К сожалению, до сих пор многие работы по нанесению полимерных покрытий выполняются вручную. Роботизация наиболее трудоемких операций все еще представляет собой насущную задачу.

Опыт эксплуатации самолетов, оснащенных РПП, показал, что в ИТПЭ в основном решены проблемы влияния внешних неблагоприятных воздействий на нанесенное покрытие. Наиболее критичными воздействиями на РПП являются: эрозия (прежде всего капельная), воздействие эксплуатационных жидкостей, механические воздействия при обслуживании. Таким образом, наибольшее количество повреждений покрытий в эксплуатации появляется как результат набухания при неустраненных течах топлива и гидрожидкостей, при ударах по покрытию при наземном обслуживании, при полетах на высоких скоростях через дождь.

Свойственные покрытиям внутренние напряжения могут проявлять себя в виде трещин или отслоений РПП. При недостаточной адгезии высокие внутренние напряжения приводят к отслоению, а при высокой адгезии – к растрескиванию РПП. Напряжения появляются прежде всего как следствие технологической усадки и как результат старения. Такая ситуация возникает при отклонении технологических процессов изготовления и нанесения РПП от оптимальных (см. рис. 24).

Из всех возможных технологий нанесения РПП на планер и двигатель самолета на сегодняшний день наиболее предпочтительной является технология напыления. Основное преимущество этой технологии заключается в возможности нанесения РПП при сохранении высокой адгезии к поверхности даже в случае ее двойной кривизны. Развитие этой технологии осложнялось необходимостью строгого радиофизического контроля покрытий непосредственно на объекте. Благодаря созданию компаундов для напыления со стабильными электрофизическими параметрами появилась возможность исключить радиофизический контроль на крупном объекте в цеху. На объекте



Рис. 24. Пример разрушения покрытия в процессе эксплуатации при нарушениях технологического процесса его производства



Рис. 25. Самолет на открытом измерительном стенде в ходе испытаний

контролируется только толщина покрытия и параметры технологического процесса, а радиофизические параметры – на образцах-свидетелях в

лабораториях. При этом полностью гарантируется обеспечение воспроизводимости ЭПР от объекта к объекту.

После проведения всех мероприятий необходимо убедиться в их эффективности. Процесс испытаний самолетов с точки зрения исследования их РЛЗ обязателен и обладает рядом специфических особенностей. Летным испытаниям предшествуют наземные, на которых проводятся наблюдения самолета в различных ракурсах. На рис. 25 показан элемент измерительного комплекса (поворотный стол), позволяющий провести на земле измерения круговых диаграмм ЭПР в широком диапазоне длин волн. Измерения можно проводить при работающем двигателе, что важно для определения ЭПР в задней полусфере. Имеется также возможность определения вклада в ЭПР отдельных элементов самолета. Следующим этапом является измерение ЭПР в условиях полета с одновременной оценкой дальности обнаружения. Для набора статистики необходимо осуществлять большое число экспериментов на земле и полетов. В некоторых случаях для сравнительных оценок организуются парные полеты, в которых участвуют малозаметный и обычный самолеты. Проведенные натурные испытания показали, что с применением описанных в статье стелс-технологий достигнуто существенное уменьшение уровня заметности серийных самолетов и других образцов техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены лишь некоторые наиболее важные вопросы, связанные с применением стелс-технологий. Отметим, что многие результаты, полученные и проверенные в процессе испытаний, уже сейчас могут быть использованы не только для самолетов, но и для кораблей и других объектов военной техники. Вместе с тем, очень хорошо видна необходимость дальнейших исследований – это, прежде всего, уменьшение веса и толщины покрытий, сокращение технологического цикла их нанесения. И, наконец, развитие подходов, позволяющих осуществить серийное производство относительно недорогих устройств, обеспечивающих маскировку антенных отсеков БРЛС (в настоящее время оценочная стоимость полной маскировки антенного отсека сравнима со стоимостью нанесения системы покрытий на всю остальную поверхность самолета). Мы полагаем, что развитие нанотехнологий, новых методов и средств измерений и вычислительных методов в ближайшее время позволит сделать следующий шаг в уменьшении РЛЗ, проблеме, являющейся важной научно-технической задачей.

Список литературы

1. Радиолокационная заметность самолетов. Обзор по материалам открытой иностранной печати/ Сост. Мони́н М.А., Ягудина И.М. - М.: ЦАГИ, 1986. № 665. 75 с.
2. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов/ Варганов М.Е., Зиновьев Ю.С., Астанин Л.Ю. и др.; Под ред. Л.Т.Тучкова. - М.: Радио и связь, 1985. - 236 с.
3. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003 – 232 с.
4. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С.В. Физические основы технологии STEALTH. – СПб.: ВВМ, 2007. – 284 с.
5. А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий// Вестник РАН. 2003. Т. 73. №9. С.779–787.
6. Васильев Е. Н. Возбуждение тел вращения. – М.: Радио и связь, 1987. 270 с
7. H. Ling, R.-C. Chou, S.-W. Lee. Rays versus modes: pictorial display of energy flow in an open-ended waveguide// IEEE Trans. Antennas and Propag. 1987. V.AP-35. No.5. P.605-607.
8. V.G. Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ Sov. Phys. Usp. 1968. V.10. P.509.
9. Ruck G.T., Barrick D.E., Stuart W.D., Kirchbaum C.K. Radar cross section handbook. – New York: Plenum Press, 1969.
10. Martin M.T., Duhl M.L. Method and apparatus using photoresistive materials as switchable EMI barriers and shielding. US Patent No.5278562, Jan.11,1994. H01Q 17/00.
11. E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley. *Radar cross section*, Artech House, Boston-London, 1993.
12. M. Hook, J.C. Vardaxoglou, K. Ward. Application of frequency selective surfaces. 27th ESA Antenna Technology Workshop on Innovative Periodic Antennas: Electromagnetic bandgap, left-handed materials, fractal and frequency selective surfaces, 9-11 March 2004; ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands, 2004.