

УДК 621.376

Методы и средства анализа и контроля радиотехнических параметров материалов космических антенн

Веденькин Д. А., Даутов О. Ш., Седельников Ю. Е.

Постановка задачи: в настоящее время важное значение приобретают радиоэлектронные средства, размещаемые в космосе. Средствами глобальной связи, навигации, мониторинга земной поверхности и околоземного пространства решается широкий круг задач как общегражданского, так и специального характера. Важнейшими элементами космических систем, во многом определяющими их технико-тактические показатели, являются бортовые антенные системы, в том числе с остронаправленными антеннами, в качестве которых в большинстве случаев применяются разворачиваемые зеркальные антенны. К ним, помимо традиционных требований, характерных для наземной и самолетной аппаратуры, предъявляется ряд специфических требований, определяемых как функциональным назначением, так и условиями работы в открытом космосе. В конструкциях остронаправленных антенн в качестве материала рефлекторов используют специальные сетчатые материалы, которые при требуемых механических характеристиках – масса, эксплуатационная стойкость, минимальная «парусность» – обеспечивают антеннам требуемые электрические показатели. Специфические требования к электрическим и механическим показателям предъявляются также к антеннам, выполненным с использованием композитных материалов. Указанные материалы должны обладать коэффициентом отражения близким к единице. В настоящее время методы средства анализа и контроля хорошо отражающих материалов разработаны в недостаточной мере. Таким образом, разработка методов анализа и контроля радиотехнических параметров указанных материалов является актуальной. **Целью работы** является изложение подходов к решению задач анализа и контроля, отражающих свойств материалов космических антенн как на этапе проектирования, так и в производственных условиях. **Используемые методы:** в части подходов к обеспечению требуемых электрических показателей ЭМС использованы: аналитические и численные методы прикладной электродинамики, вычислительный эксперимент с применением апробированных программных средств. В задачах физического контроля – методы решения изобретательских задач, классические методы радиотехнических измерений на СВЧ, современные аппаратные средства. **Новизна** заключается в предложении новых методов оценки отражающих свойств материалов антенн, реализованных на базе металлических тканей и композитных материалов. **Результат:** показана возможность получения предварительных оценок отражающих свойств сетчатых материалов расчетным путем и с использованием современных средств электродинамического моделирования общего применения. Предложены новые методы измерений отражающих свойств материалов космических антенн, выполненных на основе металлических сетеполотен и композитных материалов. Предложен ряд технических решений, реализующих указанные методы. Разработан и апробирован ряд практических установок. **Практическая значимость:** на основе предложенного метода и ряда инженерных решений предложены варианты конструкций измерительных установок.

Ключевые слова: космическая антенна, сетеполотно, космический спутник, отражательные свойства, электродинамика.

Библиографическая ссылка на статью:

Веденькин Д. А., Даутов О. Ш., Седельников Ю. Е. Методы и средства анализа и контроля радиотехнических параметров материалов космических антенн // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 4. С. 91-114. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-091-114

Reference for citation:

Vedenkin D. A., Dautov O. Sh., Sedelnikov Yu. E. Methods and means of analysis and control of radio-technical parameters of materials of space antennas. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 4, pp. 91-114 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-091-114

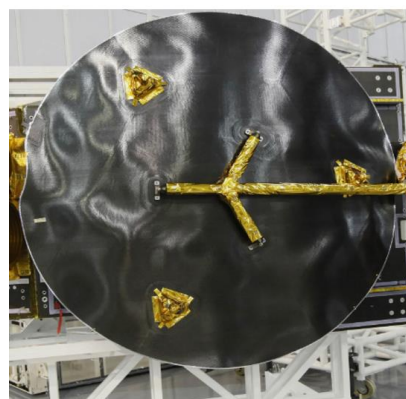
Актуальность

Антенны космического сегмента радиотехнических средств связи, навигации и мониторинга в значительной мере определяют их технические показатели. Номенклатура подобных антенн не отличается значительным многообразием. В классе остронаправленных антенн использование зеркальных антенн практически безальтернативно. При этом условия работы и специфика применения в значительной мере отличаются от аналогичной аппаратуры наземного или авиационного базирования. К их числу, помимо массогабаритных требований и очевидных, связанных с работой в открытом космосе, входит и неочевидные, не существующие в земных условиях, такие как условия минимального воздействия давления светового излучения Солнца, требующие от антенн минимально возможной «парусности». Для космических антенн относительно небольших геометрических размеров возможно использование рефлекторов со сплошной отражающей поверхностью, металлических или выполненных из композитных материалов (рис. 1).

Крупноапертурные космические антенны (рис. 2) имеют развертываемую конструкцию с отражающей поверхностью из сетеполотна, представляющего своего рода трикотажа, изготавливаемый из металлических нитей.



а)



б)

Рис. 1. Антенны на космическом аппарате: а) антенны со сплошным рефлектором; б) рефлектор из композитного материала

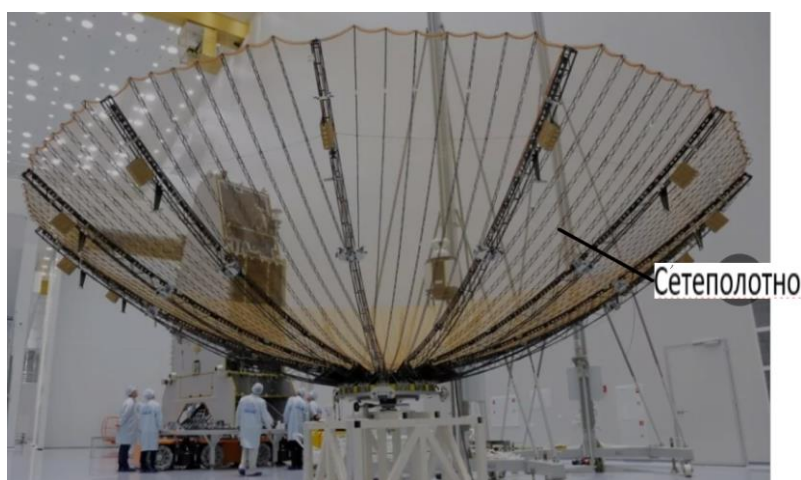


Рис. 2. Крупноапертурная антенна в цехе

Способ плетения, размеры петель, материал нитей существенным образом определяют как механические, так и электрические параметры материала, а, следовательно, и антенны в целом. На рис. 3 показаны варианты плетения из металлических нитей и структура композитного материала.

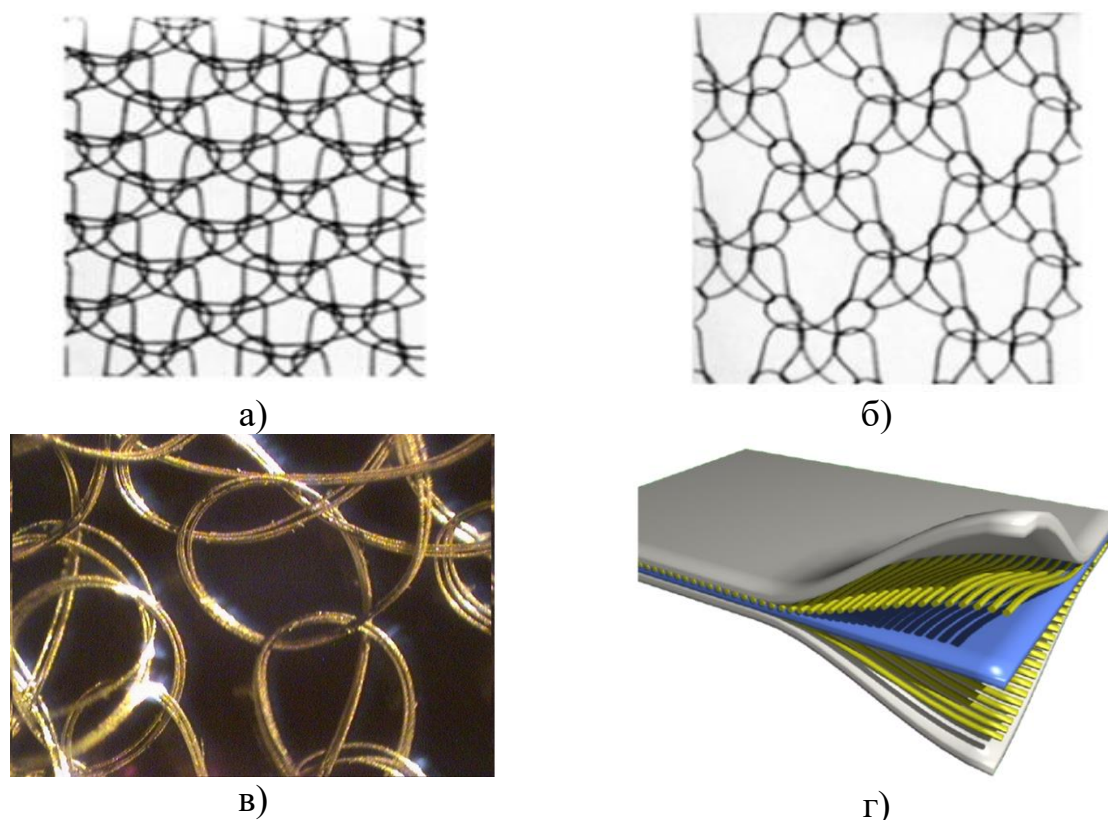


Рис. 3. Материалы рефлекторов: а, б) металлические сетеполотна; в) металлизированный полимер; г) композит на основе углеродных нитей

К настоящему времени выполнено большое число исследований (например [1-11]) и практических разработок, с целью реализации комплекса требований к механическим, электрическим и эксплуатационным показателям сетеполотен. Достигнутые результаты реализованы при создании космических антенн для систем различного назначения. Тем не менее, работы в данном направлении продолжаются, т.к. разработка и создание космических систем нового поколения, функционирующих в различных частотных диапазонах, в том числе новых, предъявляют повышенные требования как к электрическим, так и эксплуатационным характеристикам антенн.

Одним из «узких» мест остается невозможность ни сегодня, ни в среднесрочной перспективе, проведения полноценного анализа взаимосвязи конструкции и параметров сетеполотна, параметров материала с электрическими характеристиками – векторными коэффициентами отражения на различных частотах. Выполненные исследования отражающих свойств сетчатых структур, например [12-18], не позволяют определить расчетным методом показатели отражающих свойств современных материалов сетеполотен. Предпринятые по-

пытки совместного решения задач расчета механических и электрических показателей [4] являются не более чем первым шагом в этом направлении. Поэтому, не утратили актуальность дальнейшие усилия в направлении разработки практических подходов как к методам теоретического анализа отражающих свойств сетеполотен, так и экспериментальным методам анализа и контроля сетеполотен различного назначения и диапазона частот. Последнее имеет немаловажное значение еще и по той причине, что классические прямые методы антенных измерений не позволяют с требуемой степенью достоверности определять значения коэффициентов отражения близких к единице, а методика, основанная на измерении импеданса образца материала сетеполотна не может в полной мере отражать влияние поверхностного эффекта в диапазоне сверхвысоких частот. Настоящая работа представляет в конспективной форме обзор основных результатов совместных работ АО «ИСС имени академика М.Ф. Решетнева» и КНИТУ-КАИ, в том числе нашедших отражение в монографии [19]. Рассматриваются подходы, основанные на:

- 1) аналитическом решении модельных электродинамических задач;
- 2) упрощенном феноменологическом подходе с использованием экспериментальных данных;
- 3) численном решении задач с использованием существующих пакетов электродинамического моделирования сложных объектов;
- 4) экспериментальных методах.

Электродинамический анализ сетчатых структур

Достаточно полное исследование сетчатых структур предпринято в работах [14-18], где отмечается, что их изучение имеет давнюю историю. Как средство экранирования, например, можно вспомнить клетку Фарадея. Их характерной особенностью можно считать малые затраты проводника (по сравнению со сплошным металлическим экраном). Экранирующие свойства, ярко проявляющиеся для статического электричества, сохраняются до частот, при которых длина волны намного превышает размеры ячейки сетки. В эмпирическом аспекте физические свойства на качественном уровне достаточно очевидны. Однако в случаях, когда необходимо количественное описание, возникают трудности математического моделирования. При традиционном подходе (например, метод частичных областей) учет граничных условий затруднён из-за сложной геометрии (ячеистая структура из перекрестных семейств проводников малого диаметра сечения и малым шагом ячейки) и необходимости учёта проводящих свойств материала сетки. Одним из достаточно плодотворных методов решения данной проблемы является метод усредненных граничных условий, приводящий к относительно простым соотношениям для коэффициентов отражения и описанию свойств контактов между проводниками сетки [10, 11, 13, 14]. Как альтернативный подход, для построения модели сетчатых структур может быть использован метод объемных интегральных уравнений (ОИУ), построенный на другой идеологической основе и не требующий применения в явном виде граничных условий. Метод позволяет рассчитать потери в сетке с учетом проводимости ее материала. В случае сетки, образованной системой двух взаимно

ортогональных периодических решеток из цилиндрических стержней, когда период решетки d , радиуса сечения стержня a , длина волны возбуждающего поля λ связаны соотношением:

$$a \ll d \ll \lambda, \quad (1)$$

использованию метода ОИУ могут благоприятствовать упрощающие дело обстоятельства. Т.е. рассматривается достаточно мелкочастистая сетка с тонкими по сравнению с шагом стержнями и применение метода ОИУ значительно упрощается и сводится фактически к системе одномерных интегральных уравнений [20]. В этом случае объем рассеивающего тела сводится к совокупности объемов стержней. Электрическое поле в сечении каждого стержня определяется внешним по отношению к нему полем, являющимся суммой первичного поля \vec{E}_0 , возбуждающего сетчатую структуру в целом, и поля рассеяния \vec{E}_p , образованного соседними элементами структуры. Особенности метода можно проиллюстрировать на примере задачи возбуждения одиночного тонкого кругового цилиндра. Введя местную для стержня систему координат с продольной осью Z поле в каждом сечении стержня можно представить в виде:

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{z}_0 E(z) + \mathbf{E}_\perp(z), \quad (2)$$

т. е. в виде суммы продольной и поперечной составляющих. Аналогичное представление имеет и первичное поле:

$$\mathbf{E}_0(z) = \mathbf{z}_0 E_0(z) + \mathbf{E}_{\perp 0}(z). \quad (3)$$

Для одиночного диэлектрического стержня объемное интегральное уравнение распадается на два независимых уравнения относительно продольной и поперечной (векторной) составляющих поля в стержне:

$$\varepsilon_r E + 2\pi \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} (\varepsilon_r - 1) E \frac{a^2 dG_a}{R_a dR_a} dz' = E_0. \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_\perp + 2\pi \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} (\varepsilon_r - 1) \mathbf{E}_\perp \left(ik_\theta R_0 G_0 - ik_\theta R_a G_a - \frac{a^2 dG_a}{2R_a dR_a} \right) dz' = \mathbf{E}_{\perp 0}, \quad (5)$$

где $G_a = G(R_a)$, $G_0 = G(R_0)$, $G(R) = \frac{\exp(-ik_\theta R)}{4\pi R}$ – функция Грина свободного пространства, $k_\theta = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$, $R_a = \sqrt{a^2 + (z - z')^2}$, $R_0 = |z - z'|$, z_{\max} и z_{\min} – границы стержня.

Пара уравнений (4) и (5) представляют собой одно векторное интегральное уравнение Фредгольма второго рода. Оно позволяет найти среднее по сечению стержня поле $\mathbf{E}(z)$, а затем через токи с помощью интегрирования поле во всем пространстве. В частности, когда основной интерес представляет рассеянное стержнем поле \mathbf{E}_p в дальней зоне, имеют место следующие соотношения:

$$\mathbf{E}_p = -j\omega\mu_0 G(r) 2\pi (\mathbf{A} - \mathbf{r}_0 (\mathbf{A} \mathbf{r}_0)), \quad (6)$$

где \mathbf{A} – векторный потенциал токов поляризации.

$$\mathbf{A} = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} a(z')^2 (\varepsilon_r - 1) \mathbf{E}(z') \frac{J_1(k_e a \sin \theta)}{k_e a \sin \theta} \exp(jk_e z' \cos \theta) dz', \quad (7)$$

где $J_1(k_e a \sin \theta)$ – функция Бесселя 1-го рода, $a(z')$ – переменный радиус стержня. Как видно, здесь нигде не используются граничные условия. Тем не менее, в работе [21] доказано выполнение граничных условий для решения, полученного с помощью приведенной методики.

Уравнения (4), (5) могут применяться, когда размеры сечения много меньше длины волны и потери в диэлектрике невелики, что и позволяет обходиться усредненным полем в сечении. Однако в случае металлических стержней данный подход не может быть применен непосредственно и требует существенной модификации, что и реализуется ниже с адаптацией, учитывающей специфику задачи возбуждения сеточной структуры из тонких металлических стержней (нитей) в виде бесконечной решетки. Дело в том, что особенностью метода ОИУ является малый размер поперечного сечения элемента объема и поэтому можно считать однородным возбуждающее этот объем поле и поле внутри элемента объема.

Важные качественные свойства сетчатых структур могут быть изучены при анализе бесконечной структуры из параллельных электрическому полю падающей волны цилиндрических стержней. При рассматриваемых ограничениях (1) возбуждающее поле в сечении каждого стержня можно считать равномерным. При произвольной поляризации падающего поля оно может быть представлено суперпозицией полей, поляризованных параллельно и перпендикулярно оси каждого стержня, которые индуцируют внутри стержня соответственно нулевую и первую волновую гармонику. При этом интенсивность нулевой гармоники на несколько порядков выше интенсивности первой. Отсюда можно ожидать, что для сетчатой структуры из двух взаимно перпендикулярных систем параллельных стержней их исследование при нормальном падении возбуждающей плоской волны можно проводить независимо друг от друга, разлагая падающее поле на две взаимно перпендикулярные составляющие, каждая из которых возбуждает свою, ей параллельную, систему. Наличие или отсутствие контактов между двумя взаимно перпендикулярными стержнями структуры не должно сильно влиять на отражающие свойства рефлектора. Могут лишь оказывать влияние нарушение перпендикулярности однородности материала стержней в местах их соединения. В случае изготовления сетчатой структуры по технологии плетения неизбежные при этом изгибы стержней, также будут оказывать влияние на электрофизические свойства структуры. Хотя в данной работе мы ограничимся рассмотрением двух взаимно перпендикулярных систем параллельных цилиндрических стержней, каждую из которых можно анализировать отдельно, можно с уверенностью констатировать, что основной принцип метода ОИУ сохраняется и для сеток более сложной формы. Это дает возможность встраивать в алгоритм результаты анализа возбуждения единичной ячейки, не затрагивая алгоритма всей структуры в целом. При возбуждении параллельным полем плоской волны

$$\mathbf{E}_0 = z_0 \mathbf{E}_0, \quad (8)$$

а поле внутри каждого стержня

$$\mathbf{E}_i = z_0 \mathbf{E}_i, \quad (9)$$

складывается из поля, возбуждаемого (8), суммой полей соседних стержней и токами поляризации внутри самого стержня. При анализе сетчатой структуры наибольший интерес представляет случай сильного поверхностного эффекта, когда радиус стержня намного больше глубины проникновения и внутреннее поле стержня существует лишь в тонком слое вблизи границы. Прямое применение описанного выше метода получается довольно трудоемким. Ниже будет рассматриваться модификация этого подхода, более полно учитывающая конкретные особенности задачи. При рассматриваемых ограничениях основой для построения модели является модель возбуждения одиночного стержня. Приведенные в [23] соотношения позволяют исчерпывающим образом рассчитать необходимые для разработки рефлекторов из сетеполотна коэффициент отражения, коэффициент передачи, плотность поглощаемой мощности. На рис. 4-5 представлены результаты расчета коэффициента отражения и плотности мощности поглощения медного сетеполотна. Подобные расчеты выполнены для сетеполотна из вольфрамовых и стальных нитей. Поскольку медные нити обладают малой прочностью, а вольфрамовые и стальные нити обладают относительно низкой проводимостью имеет смысл выполнять сетеполотна из стальных нитей с покрытием из высоко проводящего металла. Эта возможность также исследована в [20], [21].

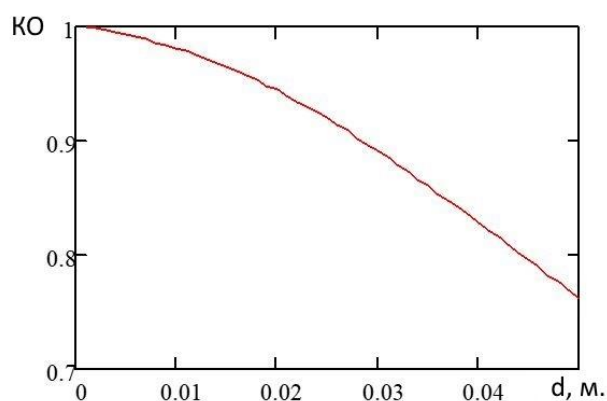


Рис. 4. Коэффициент отражения (КО) медного сетеполотна, как функция шага ячейки (d)

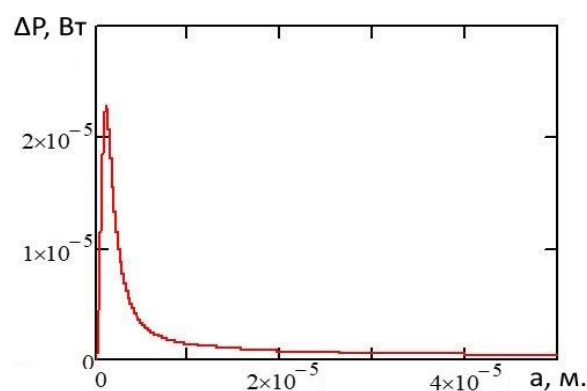


Рис. 5. Плотность мощности (ΔP), поглощаемой медным сетеполотном, как функция радиуса сечения стержня (a)

В связи с интенсивным развитием техники космической связи интерес к проектированию антенных систем возрастает представляется целесообразным сформулировать некоторые рекомендации, вытекающие из проведенных исследований.

1. Функциональной основой любого варианта ткани сетеполотна является конфигурация металлических проводников. Наибольшими отражательными свойствами обладает решетка параллельных электрическому полю падающей волны. Было проведено исследование отражательных свойств решетки, ортогональной электрическому полю падающей волны (рис. 6-7). Отражательные свойства ортогональной решетки при одном и том же шаге решетки, одинаковых радиусах сечения и металле оказываются меньше приблизительно в шесть

раз. Поэтому, если не обращать внимание на поляризационные свойства принимаемой волны, половина энергии сигнала будет потеряна даже при использовании самого дорогого металла для покрытия токонесущих проводников и совершенных в смысле диэлектрических потерь элементов конструкции.

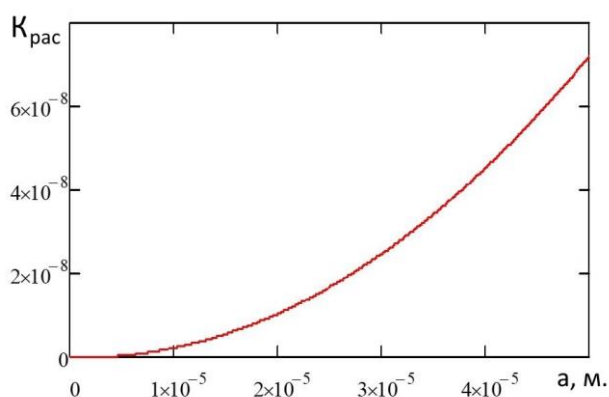


Рис. 6. Коэффициент рассеяния медного стержня ($K_{\text{рас}}$), как функция радиуса сечения (a) для ортогональной поляризации

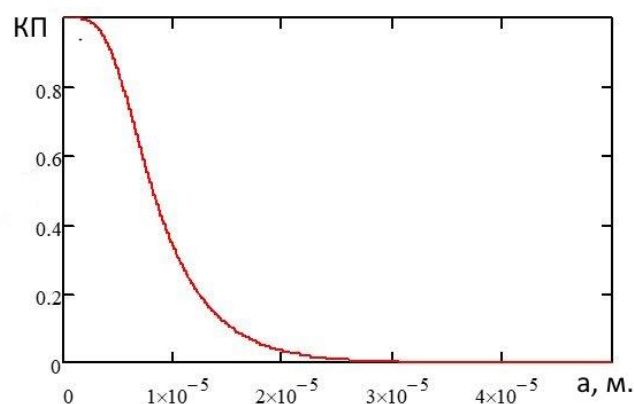


Рис. 7. Коэффициент передачи медного проводника ($KП$), как функция радиуса сечения (a) для ортогональной поляризации

2. Любые самые вычурные по конфигурации изгибы проводников, удлиняющие путь тока вдоль сопутного падающему полю сигнала эквивалентны увеличению сопротивления и, соответственно, снижению отражательных свойств рефлектора. Тем более нарушение цельности полотна, изготовление ткани из отдельных упорядоченных фрагментов, меньших по сравнению с длиной волны, приводит к тому, что сетеполотно становится искусственным диэлектриком с непредсказуемыми (возможно даже с фокусирующими) свойствами. Т. е. замена непрерывных проводников отдельными электрически несвязанными фрагментами превращает сетеполотно в совокупность дипольных отражателей и формирует вместо отражённой волны колеблющееся квазистатическое поле, превращающее сетеполотно в открытый резонатор.

3. Особый интерес представляет выявленный в процессе исследования экстремальный характер зависимости плотности поглощаемой сетеполотном мощности электромагнитного поля от радиуса сечения проводников (рис. 5). Вместо интуитивно ожидаемой зависимости незначительно отклоняющейся от монотонной имеет место крутой рост поглощения вплоть до значений радиуса, соизмеримых с толщиной скин-слоя, с последующим спадом до мощности, обусловленной скин-эффектом. Получается, что, если экономить на металле и использовать слишком тонкие проводники уменьшается не просто полезный эффект отражения, а возникает рост потерь с резким уменьшением КПД рефлектора. Аналогичный эффект возникает при окислении проводников сетеполотна, при котором объем проводника замещается непроводящим окислом (рис. 8-9). С учетом теплового эффекта можно ожидать, что в конце процесса окисления сетеполотно становится чувствительным к воздействию облучения

сигналами большой интенсивности. Возможны эффекты, подобные электрическому пробое и возгоранию сетеполотна.

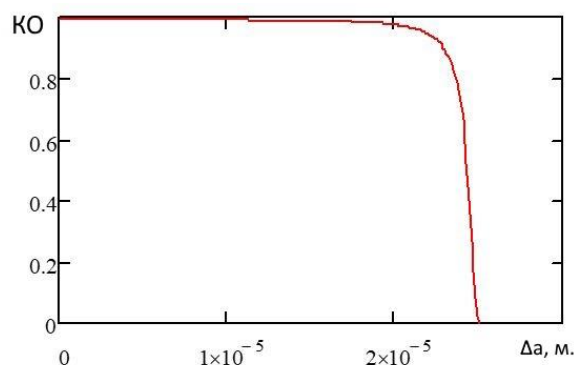


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения (КО) сетчатого полотна от толщины окисного слоя (Δa)

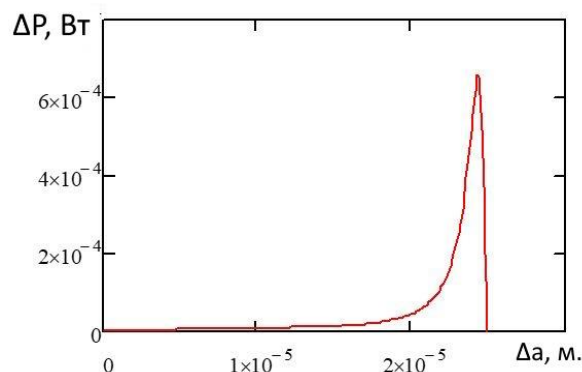


Рис. 9. Изменение плотности мощности (ΔP), поглощаемой сеткой в зависимости от толщины окисной пленки (Δa)

Завершая анализ, отметим, что сетеполотна по своим диапазонным свойствам могут служить основой широкополосных антенн для систем связи с кодовым разделением каналов, обладающих высокой помехозащищенностью, но это уже выходит за рамки данной статьи.

Электродинамическое моделирование

Использование численных методов прикладной электродинамики расширяет возможности получения количественных данных, относящихся к отражающим свойствам сетеполотен, расширяет использование численных методов прикладной электродинамики. Методы вычислений, реализованные в лучших коммерческих пакетах, таких как CST Microwave Studio, FEKO, HFSS, позволяют при корректном использовании и наличии достаточных вычислительных ресурсов решать широкий круг электродинамических задач с высокой степенью достоверности результатов. Тем не менее, проведение полного электродинамического моделирование процесса отражения плоской электромагнитной волны от образца сетеполотна, практически невозможно. Причиной является не только геометрические размеры образца и сложная реальная конфигурацией проводников (см. рис. 3), но и необходимость учета конечной проводимости материала и поверхностного эффекта. В результате корректно поставленная задача падения плоской электромагнитной волны на образец сетеполотна достаточно больших электрических размеров имела бы при осуществлении решения численными методами неприемлемо высокую размерность. В результате это означает необходимость изменения постановки задачи электродинамического моделирования с целью упрощения.

В качестве достаточно эффективного способа обхождения указанных трудностей можно использовать замену анализа процессов в свободном пространстве на случай распространения волны в волноводе необходимых размеров и конфигурации. Методическая составляющая погрешности определения коэффициента отражения, обусловленная различием значений характеристиче-

ского сопротивления для свободно распространяющейся и направляемой электромагнитных волн может быть минимизирована путем использования сверхразмерного волновода.

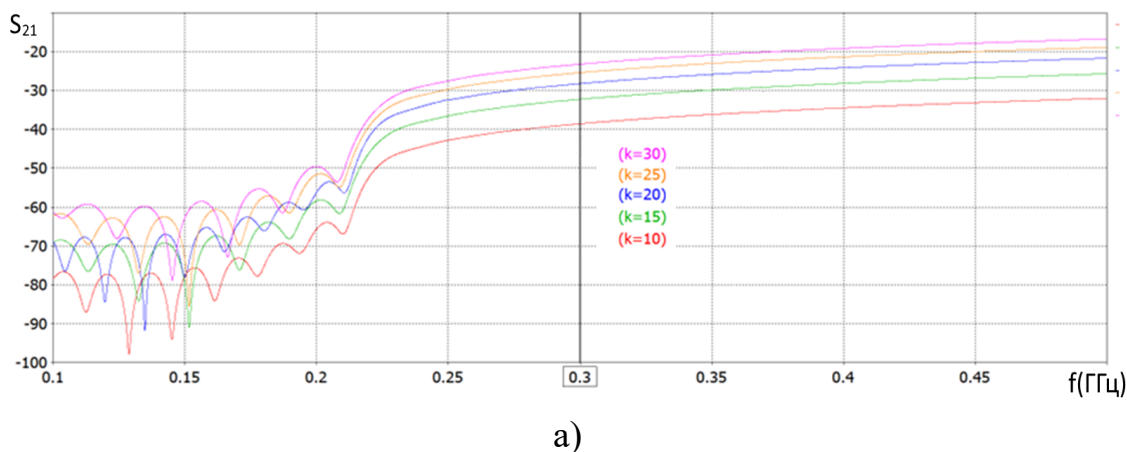
Ниже приводятся иллюстрирующие результаты моделирования. Рассматривается прямоугольный волновод с воздушным заполнением с размерами $700 \times 100 \times 1400$ мм (рис. 10). Критическая частота для рассматриваемого волновода составляет порядка 220 МГц.



Рис. 10. Волноводный тракт с тройками нитей: а) общий вид модели волноводного тракта; б) вид тракта в поперечном сечении

В поперечном сечении устанавливается система проводников, образующих моделируемое сетеполотно. Проводники могут быть выполнены из различных материалов, различной толщины и конфигурации (например, одиночные, пары, тройки и др.) Порты образованы входным и выходным поперечными сечениями волновода и возбуждаются волной типа H_{10} . Рассчитываются коэффициенты отражения S_{11} и передачи S_{21} . «Рисунок» системы проводников может иметь любую конфигурацию, в том числе с перекрещивающимися проводниками. К сожалению, учесть при этом конечное значение контактного сопротивления не представляется возможным.

В качестве иллюстрации на рис. 11 показаны результаты для случая выполнения сетки в виде тройки параллельных нитей диаметром 30 мкм, с расстоянием между нитями в тройке составляющем 1 мм и расстоянием между тройками нитей k варьируемом от 10 до 30 мм. Ввиду незначительного отличия значений S_{11} от единицы, в целях наглядности приведены данные только для коэффициентов передачи S_{21} .



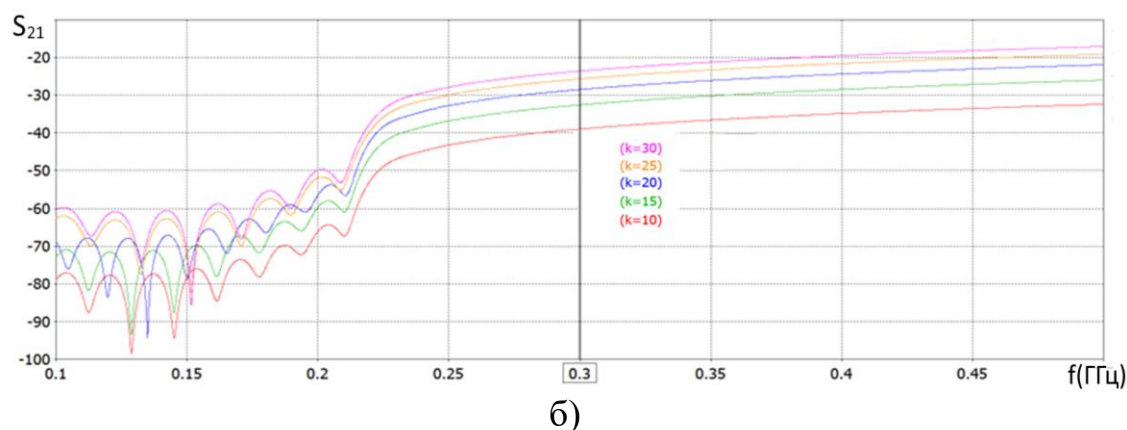


Рис. 11. Коэффициент передачи волноводного тракта (S_{21}) с тройками нитей из различных материалов: а) золото; б) молибден

Расчетно-экспериментальные методы. Феноменологический подход

Подходы и результаты, описанные выше, не позволяют учесть такой важный фактор как наличие конечного контактного сопротивления перекрещивающихся нитей, образующих сетеполотно. Величина конечного сопротивления контактов зависит от ряда факторов и не поддается точной количественной оценке путем расчетов. В этих целях в работах [11-12] применен упрощенный подход, основанный на измерении величины электрического сопротивления образца сетеполотна с последующим вычислением коэффициент отражения от границы раздела «воздух – материал с известным импедансом». Влияние поверхностного эффекта при этом оказывается вне поля зрения. Ниже рассматривается модификация этого подхода

В большинстве вариантов плетения образующаяся структура имеет сложную конфигурацию. Часто имеет место преобладающее направление металлических проводников и перпендикулярное ему, где электропроводящие участки содержат контактные участки, образованные механическим прижатием металлических нитей. Типовые участки плетения электропроводящих тканей представлены на рис. 12.

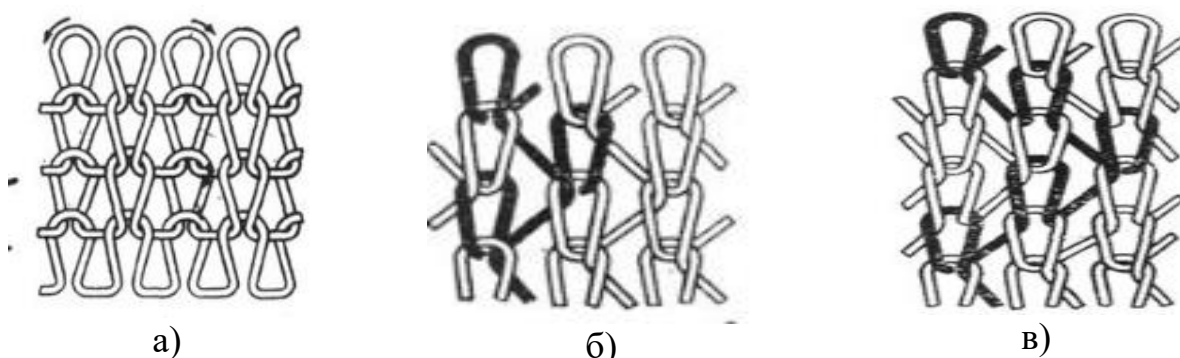


Рис. 12. Типовые участки плетения электропроводящих тканей: а) вектор \vec{E} ориентирован параллельно и перпендикулярно нитям; б) вектор \vec{E} ориентирован параллельно, перпендикулярно и наклонно нитям; в) вектор \vec{E} ориентирован параллельно, перпендикулярно и наклонно нитям

Следствием этого является анизотропия отражающих свойств сетеполотна, а именно их различие для случаев различной поляризации падающей волны – когда вектор \vec{E} параллелен или перпендикулярен сплошным нитям в структуре сетеполотна. По сравнению с гипотетической структурой в виде системы проводников с идеальным контактом в местах скрещивания [11], наличие конечного сопротивления приводит к ослаблению экранирующих свойств.

Ниже рассматривается модификация этого подхода. Различие коэффициентов отражения и прохождения для перпендикулярной и параллельной поляризации вызвана различием сопротивлений проводников, ориентированных соответствующим образом. Количественная оценка может быть получена на основе использования представления (рис. 13) и расчетных процедур, используемых при анализе коэффициентов отражения простейших сетчатых структур, образованных системой параллельных металлических проводников, заданных диаметра, шага и материала. Используя эти данные, можно оценить значения коэффициентов отражения и прохождения.

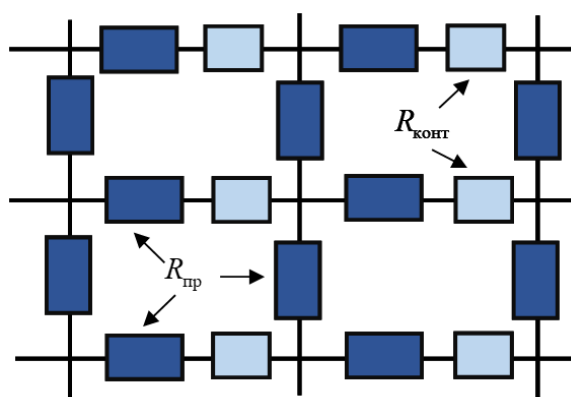


Рис. 13. Эквивалентная схема

Случай поляризации падающей волны параллельной направлению сплошных нитей плетеного материала. Пусть известны коэффициент отражения $\Gamma_{нит}$ и прохождения $T_{нит}$ сетки, образованной сплошными нитями диаметром $d_{нит}$, выполненных из материала с удельной проводимостью σ_{mat} . Наличие покрытия может не учитываться ввиду слабого влияния на электродинамические свойства объекта, что показано выше. В варианте плетеной сетки длина пути вдоль сплошного проводника сетеполотна превышает соответствующее значение для прямолинейного проводника (рис. 14).

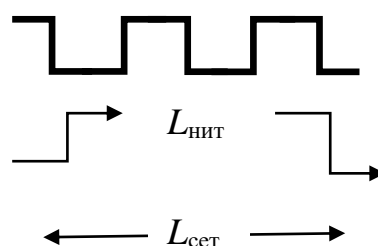


Рис. 14. Эквивалентная схема проводника сетки

При прочих равных условиях сопротивление участка проводника в сетке $R_{\text{нит}}$ превышает значение, соответствующее прямолинейному участку $R_{\text{сет}}$ за счет удлинения пути тока в проводнике:

$$R_{\text{нит}} = R_{\text{сет}} \frac{L_{\text{нит}}}{L_{\text{сет}}}. \quad (10)$$

При оценке коэффициента отражения участка сетеполотна можно считать конфигурацию сетки выполненной из проводников длиной $L_{\text{сет}}$, имеющих сопротивление $R_{\text{нит}}$. Последнее означает выполнение прямолинейного проводника сетки с диаметром и шагом соответственно сетеполотну заданной конфигурации, но выполненным из материала с меньшей удельной проводимостью:

$$\sigma_{\text{нит.пар}} = \sigma_{\text{мат}} \frac{L_{\text{сет}}}{L_{\text{нит}}}. \quad (11)$$

Для оценки коэффициентов отражения и прохождения при параллельной поляризации падающей волны можно воспользоваться соотношениями и графиками ниже представленных разделов используя значение удельной проводимости (11).

Случай поляризации перпендикулярной направлению нитей сетеполотна. Для этого случая представление (рис. 14) следует дополнить наличием сопротивления контакта соответствующих нитей в структуре сетеполотна (рис. 15).

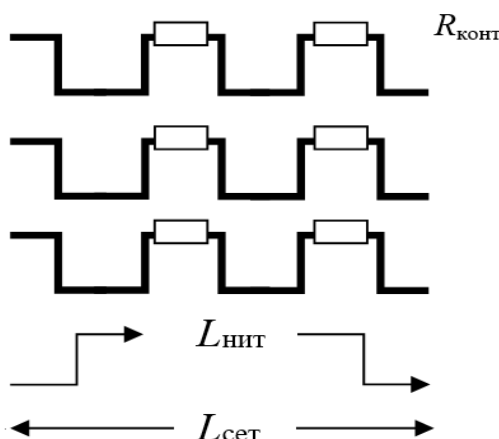


Рис. 15. Эквивалентная схема проводников сетки при перпендикулярной поляризации

Соответственно, сопротивление участка проводника, соответствующего шагу сетки

$$R_{\text{экв}} = R_{\text{конт}} + R_{\text{пр}}. \quad (12)$$

И эквивалентная проводимость материала

$$\sigma_{\text{нит.}\perp} = \frac{\sigma_{\text{мат}}}{\frac{L_{\text{сет}}}{L_{\text{нит}}} \left(1 + \frac{R_{\text{конт}}}{R_{\text{пр}}} \right)}, \quad (13)$$

где $R_{\text{пр}}$ – сопротивление проводника ячейки сетки.

Для количественной оценки коэффициентов отражения и прохождения при перпендикулярной поляризации падающей волны можно воспользоваться

приведенными соотношениями. Исходные значения сопротивлений $R_{\text{пр}}$ и $R_{\text{конт}}$ для конкретной конфигурации могут быть найдены экспериментально.

Методы измерений отражающих свойств материалов рефлекторов космических антенн

В силу причин, отмеченных выше, определить с высокой точностью коэффициент отражения материалов, используемых в конструкциях рефлекторов космических антенн, расчетным путем невозможно ни в настоящее время ни в среднесрочной перспективе. Для сетеполотен эксперимент является наиболее достоверным источником данных, для композитных материалов – безальтернативным. Измерения близких к единице коэффициентов отражения указанных материалов представляют собой специфическую задачу, существенно отличающуюся от близких по смыслу задач измерений для радиопоглощающих покрытий или ЭПР объектов.

Во-первых, практически исключается возможность непосредственного (прямого) измерения. Это связано с тем, что для этого требуется применять измерительное оборудование с чрезвычайно низкими значениями относительной погрешности $\delta_{\text{изм.отн}} \approx \Delta\Gamma_{\text{абс.доп}}$, где $\Delta\Gamma_{\text{абс.доп}}$ – допустимое отличие измеренного коэффициента отражения от фактического. Например, для случая измерения коэффициента отражения, равного $0,975 \pm 0,01$ требуется, чтобы точность измерительной аппаратуры была не хуже 0,05 дБ. При этом необходимая точность измерения может достигаться при использовании тех или иных методов, основанных на принципе дифференциальных измерений.

Во-вторых, в отличие от классических измерений ЭПР или некоторых параметров ЭМС, для измерений больших отражений стандартные методы, регламентированные соответствующим ГОСТ, отсутствуют.

В-третьих, для данного класса задач не может быть универсального метода, в равной мере эффективного для различных частотных диапазонов.

В основу организации измерений, как и в задачах анализа параметров ЭМС, может быть положено два принципиальных различных подхода: измерения в трактах и в свободном пространстве. Им присущи характерные достоинства и недостатки, приведенные в таблицах 1 и 2, проявление которых существенно зависит от диапазона частот.

Таблица 1 – Трактовые методы измерений

Основные достоинства	Основные недостатки
<ul style="list-style-type: none"> – простота осуществления; – отсутствие специальных требований к размерам и степени безэховой помещений 	<ul style="list-style-type: none"> – высокие требования к электрогерметичности мест включения измеряемых образцов сетеполотна в тракт; – наличие методической составляющей погрешности, вызванной различием характеристических сопротивлений волн в волноводе и в свободном пространстве; – принципиальная невозможность измерений композитных материалов

Таблица 2 – Измерения в свободном пространстве

Основные достоинства	Основные недостатки
<ul style="list-style-type: none"> – отсутствуют требования обеспечения хорошего электрического контакта образца; – возможность измерений при любой поляризации падающей волны 	<ul style="list-style-type: none"> – высокие требования к размерам и степени безэховости помещений; – повышенные требования к чувствительности и динамическому диапазону измерительной аппаратуры

Рассмотрению известных и описанию ряда новых методов посвящена монография [19], ставшая сегодня библиографической редкостью. Ниже приводятся данные о ряде разработанных участии авторов установок.

Установка для измерений мостовым методом. Установка предназначена для измерения коэффициента отражения в КВЧ диапазоне. Установка состоит из векторного анализатора сигналов фирмы Rohde & Schwarz типа ZVA-40, устройства крепления образца материала, двойного Т-моста, двух волноводно-коаксиальных переходов и соединительных кабелей. Общий вид установки приведен на рис. 16.

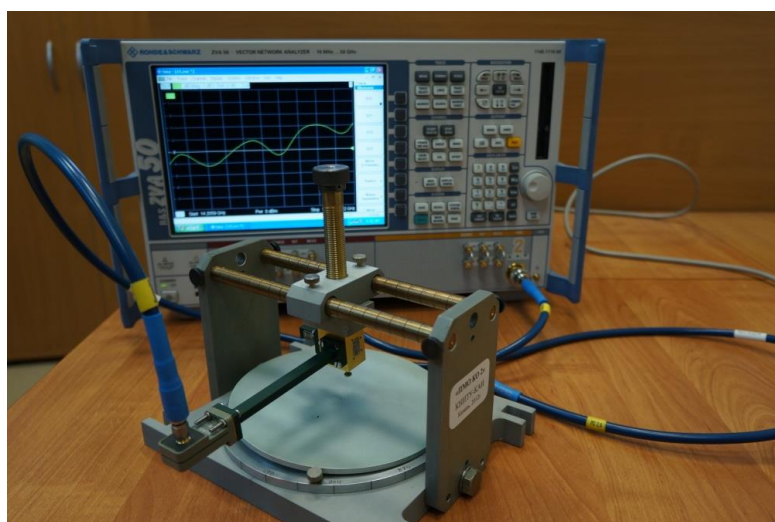


Рис. 16. Установка для измерения коэффициента отражения мостовым способом

Установка позволяет осуществить измерение коэффициента отражения образца материала в ряде точек, число точек и их расположение определяется пользователем. Измерения могут проводиться для заданного значения частоты, либо в заданной полосе частот. Используется мостовой (дифференциальный) двухкратный способ измерения: Использование двукратных измерений позволяет устранить погрешность измерения, связанную с неидентичностью плеч используемого Т-моста, а также неидентичностью устройств, подключаемых между выходами Т-моста и калибровочной и измеряемой нагрузками.

Установка для измерения коэффициента отражения в поле проходящей волны. Установка предназначена для измерения коэффициента отражения в КВЧ диапазоне. Установка состоит из векторного анализатора сигналов фирмы Rohde & Schwarz типа ZVA-40, малогабаритной безэховой камеры с устрой-

ством для установки образца материала, двух облучателей в виде волноводно-коаксиальных переходов и соединительных кабелей (рис. 17).

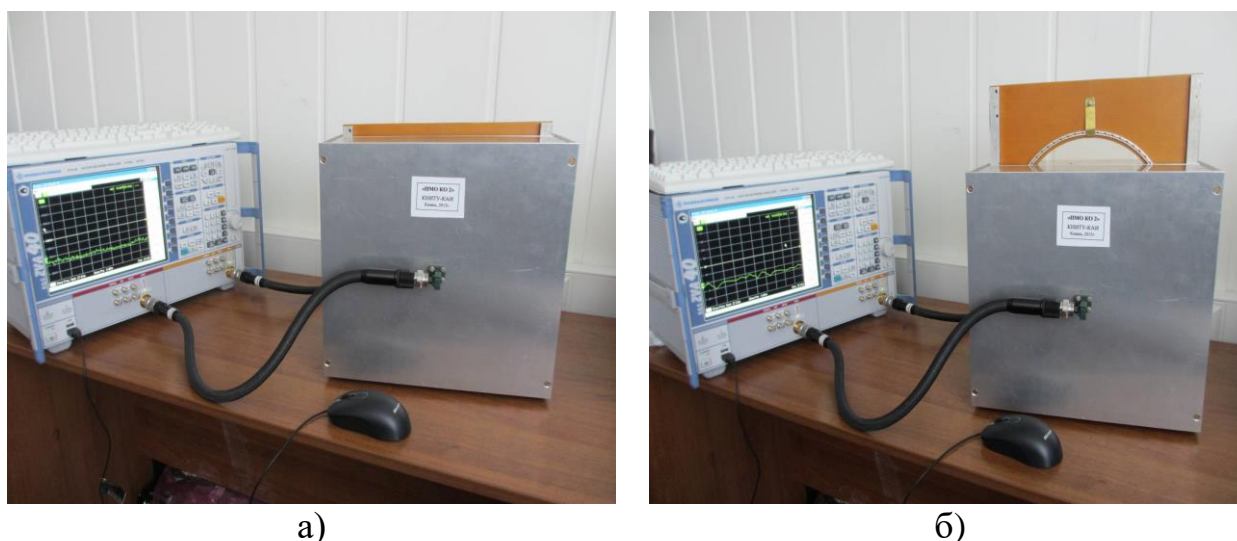


Рис. 17. Установка для измерений в КВЧ диапазоне: а) вид установки при измерении; б) с выдвинутой рамкой с образцом сетеполотна

Установка для измерения коэффициента отражения методом полукрытого резонатора. Установка предназначена для измерения коэффициента отражения в КВЧ диапазоне. Установка состоит из векторного анализатора сигналов фирмы Rohde & Schwarz типа ZVA-40 и полукрытого резонатора с зеркальным рефлектором и устройством фиксации измеряемого образца (рис. 18).

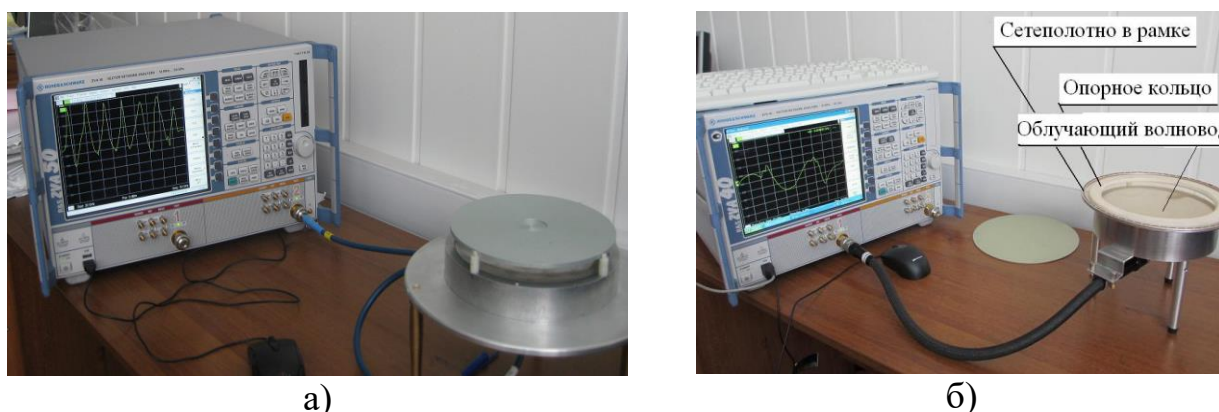
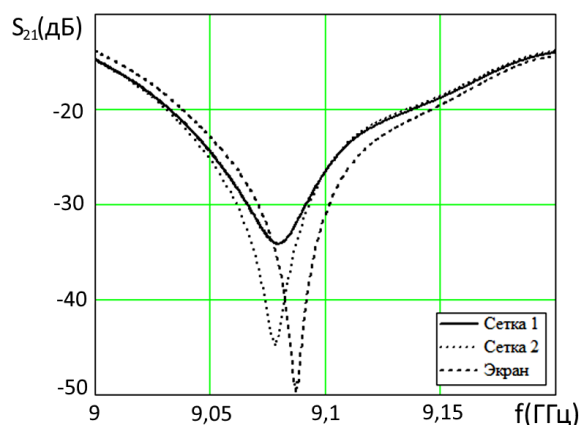


Рис. 18. Установка измерения коэффициента отражения методом полукрытого резонатора: а) вид установки в сборе; б) с образцом сетеполотна

Установка для измерения коэффициента отражения методом волноводного тройника. Установка предназначена для измерения коэффициента отражения в СВЧ диапазоне. Установка состоит из векторного анализатора цепей СВЧ и волноводного тройника с выходным фланцем, на котором устанавливается измеряемый образец. Общий вид установки показан на рис. 19.



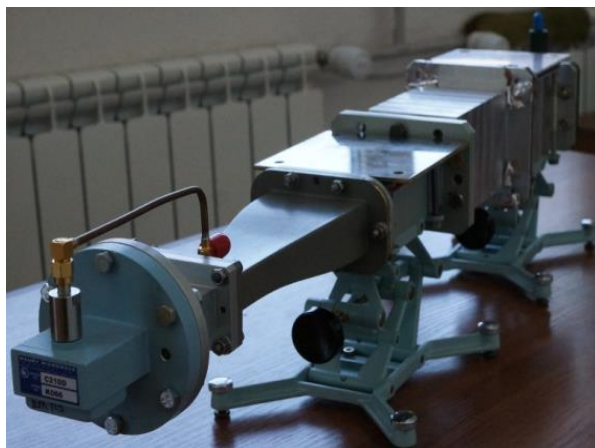
а)



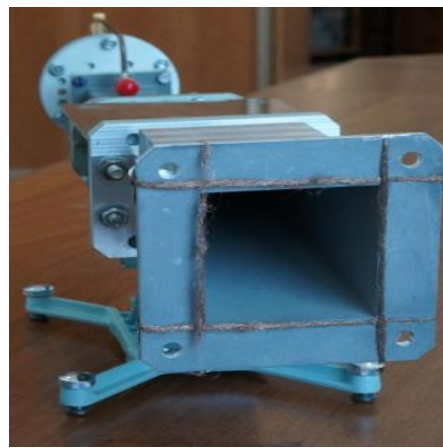
б)

Рис. 19. Установка для измерения коэффициента отражения методом тройника:
а) вид установки; б) результат измерений коэффициента передачи S_{21} для эталонного экрана и двух вариантов сетеполотна

Установка для измерения коэффициента отражения в волноводном тракте. Установка предназначена для измерения коэффициента отражения в СВЧ диапазоне. Установка состоит из векторного анализатора сигналов фирмы Rohde & Schwarz типа ZVA-40, двух металлических волноводов увеличенного поперечного сечения, двух переходов к волноводу стандартного сечения, устройства крепления образца материала, двух волноводно-коаксиальных переходов и соединительных кабелей. Общий вид установки приведен на рис. 20.



а)



б)

Рис. 20. Установка для измерения коэффициентов отражения и прохождения в волноводном тракте: а) общий вид; б) волновод увеличенного поперечного сечения

Установка для измерения коэффициента отражения методом полосковой линии. Установка состоит из векторного анализатора сигналов и отрезка полосковой линии, снабженной двумя коаксиально полосковыми переходами и предназначена для измерения коэффициента отражения в диапазоне частот от дециметрового до верхней части метрового. Используемый метод основан на измерении коэффициента передачи отрезка полосковой линии. Метод может

использоваться для измерений в относительно низкочастотных диапазонах. Общий вид установки показан на рис. 21.

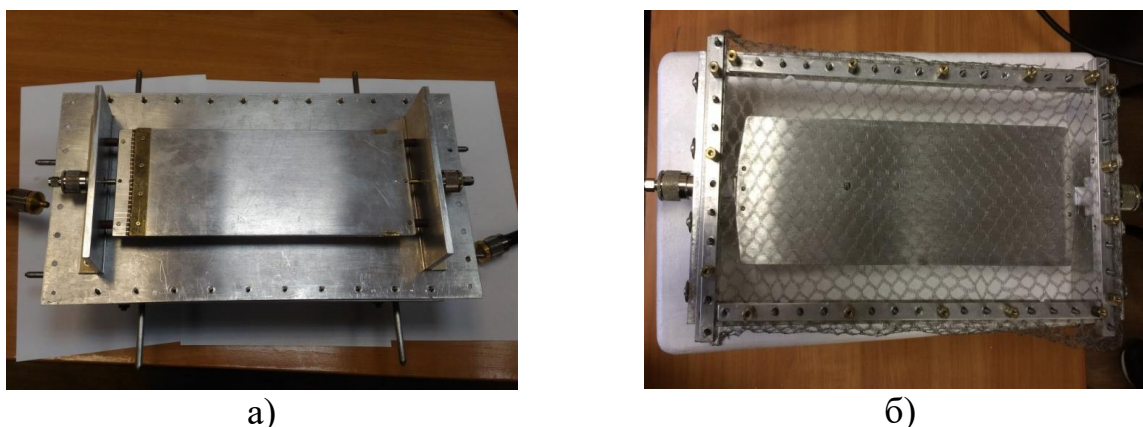


Рис. 21. Экспериментальная установка для измерения коэффициента отражения методом полосковой линии: а) вид установки на несимметричной полосковой линии; б) установка с установленным образцом сетеполотна

Заключение

Определение отражающих свойств современных материалов, используемых в конструкциях остронаправленных космических антенн представляет достаточно сложную задачу. В полной мере осуществить необходимые оценки расчетным путем не представляется возможным в силу специфики современных материалов и особенностей их применения в конструкциях антенн. В ходе работ по созданию новых крупногабаритных антенн расчетные и расчетно-экспериментальные методы, описанные в настоящей работе, могут быть полезным инструментом для предварительных оценок влияния используемых материалов, геометрических форм и способов плетения сетеполотна – металлического трикотажа. Для окончательных оценок использование экспериментальных методов определения коэффициентов отражения, в том числе с учетом их механических свойств в настоящее время безальтернативно.

Литература

1. Беляев О. Ф., Халиманович В. И. Использование текстильных технологий для создания отражающей поверхности трансформируемых космических антенн // Современные задачи инженерных наук. Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума. Москва. 2017. Том 1. С. 201–205.
2. Иванов А. В., Кушнир К. А., Симонова М. С. Разработка способа разделения радиоотражающей поверхности крупногабаритного рефлектора на выкройки из сетеполотна с крупной ячейкой // Космические аппараты и технологии. 2023. № 3 (45). С. 202-210.
3. Бабкова Е. С. Проектирование трикотажных сетчатых материалов технического назначения // Сборник XXVI Международной научно-практической конференции «Вопросы современных научных исследований». 2018. № 6–3(21). С. 432–433.

4. Самородов А. А., Солуянов А. А. Совместный расчет механических и радиолокационных характеристик калибровочных раскладных сферических отражателей // Ural Radio Engineering Journal. 2023. № 7 (3). С. 266–290. DOI: 10.15826/urej.2023.7.3.003.

5. Бабкова Е. С. Разработка технологии изготовления отражающих поверхностей трансформируемых антенн из металлотрикотажных сетеполотен с увеличенными размерами ячеек. дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02. М., 2020. 148 с.

6. Кисанов Ю. А., Фейзула Н. М., Кудрявин Л. А., Заваруев В. А. Материалы для отражательных поверхностей космических складных антенн (КСА) // Антенны. Сборник научных статей. 1981. № 29. С. 20-25.

7. Кудрявин Л. А., Халиманович В. И., Заваруев В. А., Подшивалов С. Ф., Щербаков В. П., Беляев О. Ф. Отражательная вязаная сетчатая поверхность антенны и способ ее выработки // Патент РФ №2198453, опубл. 10.02.2003, бюл. № 4.

8. Котович О. С. Проектирование структур, свойств и технологии металлических основывязанных сетеполотен для гибких отражательных поверхностей антенн. Дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2008. 166 с.

9. Рытикова И. В. Разработка технологии формирования сложноконструктивных изделий из металлических трикотажных полотен технического назначения. дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2005. 253 с.

10. Кудрявин Л. А., Беляев О. Ф., Заваруев В. А. Преимущества использования микропроволоки в два сложения для вязания отражающей поверхности трансформирующих космических антенн // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (Инновации – 2014): сборник материалов международной научно-технической конференции (Москва, 18-19 ноября 2014 г.). М.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет дизайна и технологии», 2014. Часть 1. С. 37–39.

11. Беляев О. Ф., Заваруев В. А., Халиманович В. И. Изменение характера зависимости коэффициента отражения электромагнитных волн металлотрикотажем под влиянием контактных сопротивлений // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (Инновации – 2016): сборник материалов международной научно-технической конференции (Москва, 15-16 ноября 2016 г.). М.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет дизайна и технологии», 2016. Часть 1. С. 21–25.

12. Беляев О. Ф., Заваруев В. А., Кудрявин Л. А., Подшивалов С. Ф., Халиманович В. И. Трикотажные металлические сетеполотна для отражающей поверхности трансформируемых наземных и космических антенн // Технический текстиль. 2007. № 16. С. 1–14.

13. Яцкевич В. А., Буликов Е. Н., Зеленин А. А. Защитные свойства плоских сетчатых экранов // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 11. С. 1332–1337.
14. Акимов В. П., Глыбовский С. Б., Дубрович В. К. Коэффициент усиления сетчатых рефлекторных параболических антенн произвольной глубины // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39. № 4. С. 61–67.
15. Конторович М. И., Астрахан М. И., Акимов В. П., Ферсман Г. А. Электродинамика сетчатых структур. – М.: Радио и связь, 1987. – 134 с.
16. Глыбовский С. Б. Электродинамика излучающих систем на основе тонкопроволочных сеток: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. СПб.: СПбПУ, 2013. 140 с.
17. Конторович М. И., Акимов В. И. Об экранирующем действии сферической сетки // Радиотехника и электроника. 1974. Т. 19. № 1. С. 14–19.
18. Ферсман Г. А. Частотно селективные системы на основе двойных металлических сетчатых структур. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2002. 267 с.
19. Данилов И. Ю., Романов А. Г., Тестоедов Н. А., Веденькин Д. А., Даутов О. Ш., Лаврушев В. Н., Насыбуллин А. Р., Седельников Ю. Е., Скачков В. А., Чони Ю. И., Вилков Ю. В. Анализ и контроль отражающих свойств материалов космических антенн / Монография под ред. Ю. Е. Седельникова и Н. А. Тестоедова. – Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2020. – 186 с.
20. Dautov O. Sh., Romanov A. G., Golovenkin E. N., Skachkov V. A., Shatrov A. K. The electrodynamic modelling of netted linen // IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering. 2018. Vol. 450. Issue 2. doi: 10.1088/1757-899X/450/2/022034.
21. Даутов О. Ш. Эквивалентность интегральных и интегро-функциональных уравнений электродинамических задач дифракции на неоднородных телах // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 8. С. 936–946.

References

1. Beljaev O. F., Halimanovich V. I. Ispol'zovanie tekstil'nyh tehnologij dlja sozdaniya otrazhajushhej poverhnosti transformiruemyh kosmicheskikh antenn. *Sovremennye zadachi inzhenernyh nauk*. Sbornik nauchnyh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo simpoziuma. [Contemporary challenges in engineering sciences. Proceedings of the International scientific and technical symposium.]. Moscow, 2017, vol. 1, pp. 201–205 (in Russian).
2. Ivanov A. V., Kushnir K. A., Simonova M. S. Razrabotka sposoba razdelenija radiootrazhajushhej poverhnosti krupnogabaritnogo reflektora na vykrojki iz setepolotna s krupnoj jachejkoj [Development of a method for dividing the radio-reflective surface of a large-sized reflector into patterns made of mesh with a large cell]. *Kosmicheskie apparaty i tehnologii*, 2023, no. 3 (45), pp. 202–210 (in Russian).

3. Babkova E. S. Proektirovanie trikotazhnyh setchatyh materialov tekhnicheskogo naznachenija. *Voprosy sovremennyh nauchnyh issledovanij. Sbornik XXVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Problems of modern scientific research. Proceedings of the XXVI International scientific and practical conference], 2018, no. 6-3 (21), pp. 432–433 (in Russian).

4. Samorodov A. A., Solujanov A. A. Sovmestnyj raschet mekhanicheskikh i radiolokacionnykh kharakteristik kalibrovochnykh raskladnykh sfericheskikh otrazhatelej [Joint calculation of mechanical and radar characteristics of calibration folding spherical reflectors]. *Ural Radio Engineering Journal*, 2023, no. 7 (3), pp. 266–290. doi: 10.15826/urej.2023.7.3.003.

5. Babkova E. S. *Razrabotka tekhnologii izgotovlenija otrazhajushhih poverhnostej transformiruemykh antenn iz metallotrikotazhnykh setepoloten s uvelichennymi razmerami jacheek*. Diss. kand. tehn. Nauk [Development of a Technology for Manufacturing Reflective Surfaces of Transformable Antennas From Metal-Knitted Mesh with Increased Cell Sizes. Ph.D. Thesis]. Moscow, The Kosygin State University of Russia, 2020. 148 p. (in Russian).

6. Kisanov Ju. A., Fejzula N. M., Kudrjavin L. A., Zavaruev V. A. Materialy dlja otrazhatel'nykh poverhnostej kosmicheskikh skladnykh antenn (KSA) [Materials for reflective surfaces of space folding antennas (SFA)]. *Antenny. Sbornik nauchnykh statej*, 1981, no. 29, pp. 20-25 (in Russian).

7. Kudrjavin L. A., Halimanovich V. I., Zavaruev V. A., Podshivalov S. F., Shherbakov V. P., Beljaev O. F. Otrazhatel'naja vjazanaja setchataja poverhnost' anteny i sposob ee vyrabotki [Reflective knitted mesh surface of an antenna and a method for producing it]. Patent Russia, no. 2198453, 2003.

8. Kotovich O. S. Proektirovanie struktur, svojstv i tekhnologii metallicheskih osnovovjazanykh setepoloten dlja gibkikh otrazhatel'nykh poverhnostej antenn. Diss. kand. tehn. nauk [Design of structures, properties and technology of metal warp-knitted mesh fabrics for flexible reflective surfaces of antennas. Ph.D. Thesis]. Moscow, Moscow State Textile University named after. A.N. Kosygina, 2008. 166 p. (in Russian).

9. Rytikova I. V. Razrabotka tekhnologii formirovanija slozhnokonstruktivnykh izdelij iz metallicheskih trikotazhnykh poloten tekhnicheskogo naznachenija. Diss. kand. tehn. nauk [Development of technology for forming complex structural products from metallic knitted fabrics for technical purposes. Ph.D. Thesis]. Moscow, Moscow State Textile University named after. A.N. Kosygina, 2005. 253 p. (in Russian).

10. Kudrjaev L. A., Beljaev O. F., Zavaruev V. A. Preimushhestva ispol'zovanija mikroprovodov v dva slozhenija dlja vjazanija otrazhajushhej poverhnosti transformirujushhih kosmicheskikh antenn [Advantages of Using Double-stranded Microwire for Knitting the Mating Surface of Transforming Space Antennas]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii Dizajn, tekhnologii i innovacii v tekstil'noj i legkoj promyshlennosti (Innovacii – 2014)* [Proceedings the International scientific and technical conference “Design, technology and innovation in the textile and light industry (Innovations – 2014)”], Moscow, November 18-19, 2014, vol. 1, pp. 37-39 (in Russian).

11. Beljaev O. F., Zavaruev V. A., Halimanovich V. I. Izmenenie haraktera zavisimosti kojefficienta otrazhenija jelektromagnitnyh voln metallotrikotazhem pod vlijaniem kontaktnyh soprotivlenij [Changes in the nature of the dependence of the reflection coefficient of electromagnetic waves by metal knitwear under the influence of contact resistance]. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii Dizajn, tehnologii i innovacii v tekstil'noj i legkoj promyshlennosti (Innovacii – 2016)* [Proceedings the International scientific and technical conference “Design, technology and innovation in the textile and light industry (Innovations – 2016)”], Moscow, November 15-16, 2016, vol. 1, pp. 21-25 (in Russian).

12. Beljaev O. F., Zavaruev V. A., Kudrjavin L. A., Podshivalov S. F., Halimanovich V. I. Trikotazhnye metallicheskie setepolotna dlja otrazhajushhej poverhnosti transformiruemyh nazemnyh i kosmicheskikh antenn [Knitted metal mesh fabrics for the reflective surface of transformable ground and space antennas]. *Tekhnicheskij tekstil'*, 2007, no. 16, pp. 1-14 (in Russian).

13. Jackevich V. A., Bulikov E. N., Zelenin A. A. Zashhitnye svojstva ploskih setchatyh jekranov [Protective properties of flat mesh screens]. *Journal of Communications Technology and Electronic*, 2004, vol. 49, no. 11, pp. 1332-1337 (in Russian).

14. Akimov V. P., Glybovskij S. B., Dubrovich V. K. Kojefficient usilenija setchatyh reflektornyh parabolicheskikh antenn proizvol'noj glubiny [Gain of mesh reflector parabolic antennas of arbitrary depth]. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, no. 4, pp. 61-67 (in Russian).

15. Kontorovich M. I., Astrahan M. I., Akimov V. P., Fersman G. A. *Jelektrodinamika setchatyh struktur* [Electrodynamics of mesh structures]. Moscow, Radio and communication, 1987. 134 p. (in Russian).

16. Glybovskij S. B. Jelektrodinamika izluchajushhih sistem na osnove tonkoprovolochnykh setok. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Electrodynamics of radiating systems based on thin-wire meshes. Ph.D. Thesis]. Saint Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2013. 140 p. (in Russian).

17. Kontorovich M. I., Akimov V. I. Ob jekranirujushhem dejstvii sfericheskoy setki [Shielding effect of a spherical mesh]. *Journal of Communications Technology and Electronic*, 1974, vol. 19, no. 1, pp. 14-19 (in Russian).

18. Fersman G. A. Chastotno selektivnye sistemy na osnove dvojnykh metallicheskih setchatyh struktur. Diss. d-ra fiz.-mat. nauk [Frequency selective systems based on double metal mesh structures. Doct. Thesis]. Saint Petersburg, Peter the Great Saint-Petersburg State Institute of Technology, 2002. 267 p. (in Russian).

19. Danilov I. Ju., Romanov A. G., Testodov N. A., Vedenkin D. A., Dautov O. Sh., Lavrushev V. N., Nasybullin A. R., Sedelnikov Ju. E., Skachkov V. A., Choni Ju. I., Vilkov Ju. V. *Analiz i kontrol' otrazhajushhih svojstv materialov kosmicheskikh antenn. Monografija* [Analysis and control of reflective properties of space antenna materials. Monography]. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 2020. 186 p. (in Russian).

20. Dautov O. Sh., Romanov A. G., Golovenkin E. N., Skachkov V. A., Shatrov A. K. The electrodynamic modelling of netted linen [IOP Conference Series:

Materials, Science and Engineering], 2018, vol. 450, no. 2, doi: 10.1088/1757-899X/450/2/022034.

21. Dautov O. Sh. Jekvivalentnost' integral'nyh i integro-funkcional'nyh uravnenij jelektrodinamicheskikh zadach difrakcii na neodnorodnyh telah [Equivalence of integral and integro-functional equations of electrodynamic problems of diffraction on inhomogeneous bodies]. *Radiophysics and quantum, electronics*, 1991, vol. 34, no. 8, pp. 936-946 (in Russian).

Статья поступила 25 сентября 2025 г.

Информация об авторах

Веденькин Денис Андреевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Радиофотоники и микроволновых технологий. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. Область научных интересов: антенны, СВЧ устройства, электромагнитная совместимость, сети и системы передачи данных. E-mail: denis_ved@mail.ru

Даутов Осман Шакирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиоэлектронных и телекоммуникационных систем. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. Область научных интересов: антенны, СВЧ устройства, радиофизика. E-mail: dautov_kstu@mail.ru

Седельников Юрий Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиофотоники и микроволновых технологий. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. Область научных интересов: антенны, СВЧ устройства, электромагнитная совместимость. E-mail: sedhome2013@yandex.ru

Адрес: 420111, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10.

Methods and means for analysis and control of radiotechnical parameters of space antenna materials

D. A. Vedenkin, O. Sh. Dautov, Y. E. Sedelnikov

Problem statement. Space-based electronic equipment is currently gaining significant importance. Global communications, navigation, and monitoring of the Earth's surface and near-Earth space solve a wide range of problems, both general civil and specialized. Onboard space antenna systems, including highly directional antennas, which in most cases are deployable reflector antennas, are crucial elements of space satellites, largely determining their technical and tactical performance. In addition to the traditional requirements for ground-based and airborne equipment, these systems are subject to a number of specific requirements determined by both their functional purpose and the operating conditions in outer space. Highly directional antenna designs utilize special mesh materials as reflector materials, which, while maintaining the required mechanical characteristics (weight, operational durability, and minimal windage), provide the antennas with the required electrical performance. Specific electrical and mechanical performance requirements are also imposed on antennas made using composite materials. These materials must have a reflectivity close to unity. Currently, methods for analyzing and testing highly reflective materials are insufficiently developed. Therefore, the development of methods for analyzing and testing the radio-technical parameters of these materials is urgent. **The purpose** is to present approaches to solving problems of analyzing and test-

ing the reflective properties of space antenna materials, both at the design stage and in production conditions. **Methods.** For approaches to ensuring the required electrical and EMC performance, the following were used: analytical and numerical methods of applied electrodynamics, and a computational experiment using proven software. For physical testing, inventive problem-solving methods, classical microwave radio-technical measurement methods, and modern hardware were used. **Novelty** lies in the proposal of new methods for assessing the reflective properties of antenna materials based on metallic fabrics and composite materials. **Result.** The feasibility of obtaining preliminary estimates of the reflective properties of mesh materials through calculations and using modern general-purpose electrodynamic modeling tools is demonstrated. New methods for measuring the reflective properties of space antenna materials based on metal mesh fabrics and composite materials are proposed. A number of technical solutions implementing these methods are proposed. A number of practical setups have been developed and tested. **Practical relevance** of the work based on the proposed method and a number of engineering solutions, design options for measuring setups are proposed.

Key words: Space antenna, mesh materials, space satellite, reflective properties, electrodynamics .

Information about Authors

Denis Andreevich Vedenkin – Ph.D. of Engineering Sciences. Docent. Associate Professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Field of research: antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility, networks and data transmission systems. E-mail: denis_ved@mail.ru

Osman Shakirovich Dautov – D.Sc. of Engineering Sciences. Full Professor. Professor at the Department of Radioelectronic and Telecommunication Systems. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Field of research: antennas, microwave devices, radiophysics. E-mail: dautov_kstu@mail.ru

Yury Evgenyevich Sedelnikov – D.Sc. of Engineering Sciences. Full Professor. Professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Field of research: antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility. E-mail: sedhome2013@yandex.ru

Address: 420111, Russia, Kazan, Karl Marx str., 10.