

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.9>

УДК: 621.396.67, 532.517, 551.506

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

М.Ю. Звездина^{1,2}, А.М. Шапошникова², Ю.А. Шокова¹, Д.С. Федоров²

¹ Донской государственный технический университет
344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

² Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи
344038, Ростов-на-Дону, ул. Нансена, д.130

Статья поступила в редакцию 28 марта 2023 г.

Аннотация. Приводится электродинамическая модель однозеркальной антенны миллиметрового диапазона длин волн, в рефлекторе которой находится слой водных осадков в виде лужи. Для обоснования необходимости разработки модели выполнена оценка влияния метеорологических осадков при проектировании зеркальных антенн миллиметрового диапазона длин волн, сформулирована цель исследований: разработка электродинамической модели параболического рефлектора зеркальной антенны со слоем водных осадков, параметры которого выбраны с учетом климатического района размещения. Выполнен анализ известных моделей однозеркальных антенн со слоем осадков, показавший, известные модели не описывают процесс функционирования зеркальной антенны миллиметрового диапазона длин волн с рефлектором, в котором образовалась лужа воды. Для оценки влияния данного образования на характеристики направленности антенны предложено использовать апертурный метод, используемый для зеркальных антенн с дефектами профиля рефлектора. Приводятся результаты моделирования диаграммы направленности зеркальной антенны с лужей в рефлекторе. Показано, что появление лужи приводит к несимметричному изменению уровня первых боковых лепестков диаграммы

направленности в вертикальной плоскости. В горизонтальной плоскости изменения наблюдаются в росте уровня боковых лепестков, кроме первого. Симметрия лепестков при этом не нарушается. **Предмет исследования:** процесс излучения электромагнитной волны миллиметрового диапазона длин волн однозеркальной антенной со слоем водных осадков в рефлекторе. **Объект исследования:** система «рефлектор зеркальной антенны со слоем водных осадков – электромагнитная волна миллиметрового диапазона длин волн». **Методология:** метод метеорологического электромагнетизма, модифицированный апертурный метод, модифицированный метод Ruze, метод статистической метеорологии. **Основной результат:** разработана система беспроводной связи с помощью магнитной компоненты электромагнитного поля. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть полезны при разработке зеркальных антенн миллиметрового диапазона длин волн для оценки влияния метеорологических осадков на характеристики направленности. Материалы статьи докладывались на VIII Всероссийской микроволновой конференции «Microwaveweek- 2022».

Ключевые слова: зеркальная антенна, электродинамическая модель, метеорологические факторы, слой осадков в виде лужи в рефлекторе, характеристики направленности.

Автор для переписки: Шапошникова Анна Маратовна, anywolverine@rambler.ru

Введение

Зеркальные антенные системы давно применяются в связи, радиолокации и радионавигации, что обусловлено особенностями их конструкции, в основе которой лежат законы геометрической оптики. Однако они же определяют и основные недостатки конструкции, в частности, необходимость обеспечения стабильности электрических параметров рефлектора при эксплуатации в условиях воздействия климатических факторов [1-8]. Стабилизация радиотехнических характеристик антенн осуществляется на этапе их проектирования [8], причем необходимость в стабилизации возрастает с ростом

рабочей частоты. Это обусловлено несколькими факторами, в частности, наличием погрешностей в решении задачи о нахождении структуры возбуждаемого зеркальной антенной электромагнитного поля, обусловленных необходимостью применения на этапе проектирования зеркальной антенны численно-аналитических методов (метода геометрической оптики, метода физической оптики, метода геометрической теории дифракции и др.) вследствие отсутствия строгих методов. Переход в миллиметровый диапазон длин волн (ММДВ) приводит к росту данных погрешностей вследствие изменения профиля рефлектора и его электрических свойств при воздействии на зеркальную антенну климатических факторов [8-12]. Как известно, одним из способов защиты зеркальной антенны от влияния климатических факторов являются радиопрозрачные укрытия (РПУ) для антенн [8,13]. Однако из-за существенных материальных затрат, обусловленных, в том числе, необходимостью проектирования РПУ для каждой конкретной антенны, указанные средства применяются либо при эксплуатации в экстремальных условиях (сильном (порядка 240 км/ч) ветре, больших ($\pm 50^{\circ}\text{C}$) перепадах температур, снеговых нагрузках от 100 до 300 кг/м³ в верхней полусфере РПУ, радиальная толщина слоя льда от 1 до 12 см), либо для защиты от коррозии при воздействии морской воды (морских брызг). Во всех остальных случаях целесообразным является разработка антенн, устойчивых к воздействию климатических факторов. Следует отметить, что особенности воздействия солнечного нагрева и деформации рефлектора при ветровой нагрузке подробно рассмотрены в [13]. Однако вопрос о воздействии метеорологических осадков на радиотехнические характеристики зеркальной антенны ММДВ подробно не изучался, поскольку вследствие сложности описания физических процессов методы моделирования влияния внешних воздействий на характеристики антенн ММДВ к настоящему времени разработаны недостаточно полно, что делает предлагаемую тему исследований актуальной.

Для снижения сложности исследуемой проблемы воспользуемся предложенным в [11] подходом, позволяющим представить общие потери на

трассе с осадками (гидрометеорами) в виде совокупности двух составляющих: на трассе (вне антенны) и непосредственно на антенне. Вклады данных составляющих в суммарные потери различаются. По данным [14] на трассах малой длины 67 % потерь энергии электромагнитной волны приходится на вторую составляющую. Учитывая данный факт, а также возможность управления данной составляющей на этапе проектирования, ограничим область исследований областью на антенне.

Учитывая сказанное выше, сформулирована *цель статьи* – разработка электродинамической модели параболического рефлектора зеркальной антенны со слоем водных осадков (дождя, наледи, снега), параметры (толщина слоя, конфигурация границ, электрические параметры) которого выбраны с учетом климатического района размещения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *научные задачи*:

1. Провести анализ известных электродинамических моделей однозеркальной антенны с параболическим рефлектором со слоем метеорологических осадков.

2. Разработать электродинамическую модель однозеркальной антенны ММДВ с параболическим рефлектором, позволяющую научно обоснованно задавать параметры слоя метеорологических осадков и учитывать их влияние на характеристики направленности антенны.

3. Выявление возможных искажений характеристики направленности однозеркальной антенны ММДВ вследствие появления слоя осадков на параболическом рефлекторе.

1. Анализ известных электродинамических моделей однозеркальной антенны с параболическим рефлектором со слоем метеорологических осадков

Результаты выполненного анализа известных и предлагаемых авторами электродинамических моделей параболического рефлектора со слоем метеорологических осадков сведены в табл.1.

Таблица 1 – Результаты анализа электродинамических моделей параболического рефлектора со слоем метеорологических осадков

Принцип построения	Достоинства	Недостатки
Эффект мокрой антенны.		
<i>Назначение</i> – оценка нижнего уровня потерь энергии вследствие появления на рефлекторе влажных областей		
Долевое соотношение «сухой» и «влажной» поверхностей рефлектора	<ol style="list-style-type: none"> 1. Малые вычислительные затраты. 2 Быстрая оценка нижнего уровня потерь энергии вследствие намокания рефлектора антенны. 3. Возможность применения в качестве критерия для оценки способов защиты рефлектора зеркальной антенны от дождя. 	Учет только одного фактора – изменения влажности рефлектора независимо от способа данного изменения.
Плоскостойкая модель.		
<i>Назначение</i> – оценка потерь энергии в слое с осадками		
Модификация Сколником общего представления Френеля падающей на границу раздела двух сред плоской электромагнитной волны: для частного случая многослойной диэлектрической среды с металлическим экраном наряду с отраженной от верхней границы и прошедшей волны появляются две дополнительные	<ol style="list-style-type: none"> 1. Позволяет оценить потери энергии ЭМВ в слое с водными осадками. 2. Допускает аналитическое представление результатов. 3. Небольшие вычислительные затраты. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отказ от учета кривизны поверхности рефлектора. 2. Невозможность расчета характеристики направленности антенны. 3. Использование только для пленки воды. <p>Предложенная авторами модернизация позволяет проводить оценку для всех видов водных осадков с научно обоснованным выбором параметром слоя осадков.</p>

<p>волны: поглощенная в среде и отраженная от экрана и вышедшая из слоя</p>		
<p align="center">Модель параболического рефлектора с ограничениями на тип осадков и форму границ слоя. <i>Назначение</i> – расчет характеристики направленности по известному распределению токов на внутренней поверхности рефлектора</p>		
<p>Метод физической оптики</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Учет кривизны поверхности рефлектора. 2. Учет частных случаев форм границ слоя. 3. Возможно получение аналитических выражений для характеристики направленности антенны со слоем осадков. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сложность задания геометрических параметров слоя осадков. 2. Разработка моделей заполнения рефлектора осадков для трех частных случаев (только два типа задания толщины слоя: равномерно и в виде области между двумя параболоидами вращения) без указания условий их реализации. 3. Электрические параметры слоя осадков задаются независимо от климатического района места размещения осадков. 4. Ограничение типов водных осадков – водная пленка и слой снега. 5. Большая размерность получаемой при редуцировании системы линейных алгебраических уравнений.
<p align="center">Модель параболического рефлектора с лужей в рефлекторе (ПРЕДЛАГАЕМАЯ). <i>Назначение</i> -расчет характеристики направленности по известному амплитудно-фазовому распределению поля в апертуре антенны</p>		

<p>Применение положений теории метеорологического электромагнетизма: сочетание апертурного метода для вычисления искажений в структуре электромагнитного поля, возникающих вследствие деформации поверхности рефлектора слоем осадков, метода J. Ruze для учета деформаций и статистической метеорологии для выбора параметров слоя осадков в зависимости от места размещения антенны</p>	<p>1. Учет кривизны поверхности рефлектора. 2. Учет типовых вариантов границ слоя осадков на основе предварительного анализа процесса падения осадков на рефлектор. 3. Научно-обоснованное задание параметров слоя осадков в зависимости от климатического района места размещения антенны, а также свойств слоя защитного покрытия на рефлекторе. 4. Возможность быстрого изменения модели при изменении климатического района размещения антенны.</p>	<p>1. Отказ от учета аномальных погодных явлений. 2. Выбор параметров слоя осадков для строгого режима эксплуатации (режим наихудшего случая). 3. Необходимость проведения дополнительных исследований по оценке климатического района размещения антенны на основе данных статистической метеорологии.</p>
---	--	---

Дадим более подробный анализ описанных в табл.1 моделей.

Эффект мокрой антенны (wetantenna) количественно оценивается величиной дополнительных потерь энергии P_L на влажной поверхности рефлектора по сравнению с полностью сухим рефлектором [15]:

$$P_L = 1 - 3,448^{-5,138S+1,949} - 0,98 \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где S - доля сухой поверхности рефлектора.

Нижняя граница уровня потерь энергии электромагнитной волны на рефлекторе антенны, обусловленная отличием поверхности от сухой и достигаемая без учета параметров слоя – толщины слоя осадков, их типа, электрических параметров типов осадков, как следует из анализа рис. 1, может составлять -10 дБ.

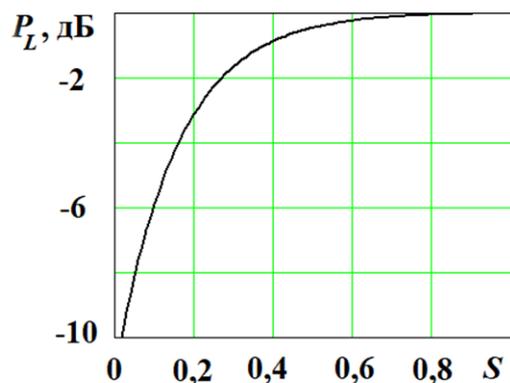


Рис. 1. Зависимость дополнительных потерь мощности в раскрыве антенны от доли сухой поверхности рефлектора S (эффект мокрой антенны)

В качестве возможной области применения данной модели может выступать предварительная оценка средств и способов защиты рефлектора зеркальной антенны от намокания.

Плоскостойные модели для рефлектора со слоем метеорологических осадков зеркальных антенн позволяют в отличие от эффекта мокрой антенны проводить оценку возможных потерь энергии электромагнитной волны в слое осадков на рефлекторе с учетом высоты слоя осадков, их типа, а также электрических параметров.

Следует отметить, что исходная модель была разработана на этапе применения ММДВ только в метеорологических радарх, первоначально выполняемых по технологии плоских антенных решеток [16,17]. Далее данная модель стала применяться для зеркальных антенн с параболическим рефлектором, а также для оценки потерь энергии в РПУ [1-3,13,16-18].

В качестве оцениваемой величины в плоскостойных моделях в зависимости от поставленной задачи выступают либо коэффициент радиопрозрачности слоя (потери на прохождение слоя осадков) [16,17,18]:

$$\Pi = -10\lg(|T|^2) = -10\lg(|1 - R|^2), \quad (2)$$

либо яркостная температура [13]:

$$T_b = RT_a + (1 - R)T_w, \quad (3)$$

где R - коэффициент отражения по мощности на границе раздела сред «воздух – верхняя граница слоя осадков»; T_a - яркостная температура на границе раздела сред «воздух – вода»; T_w - яркостная температура на границе раздела сред «нижняя граница слоя осадков – металл». Геометрия задачи в описываемом плоскостойком представлении показана на рис. 2 из [7]. На данном рисунке коэффициент отражения по мощности на границе раздела сред «воздух – вода» обозначен как R_{321} .

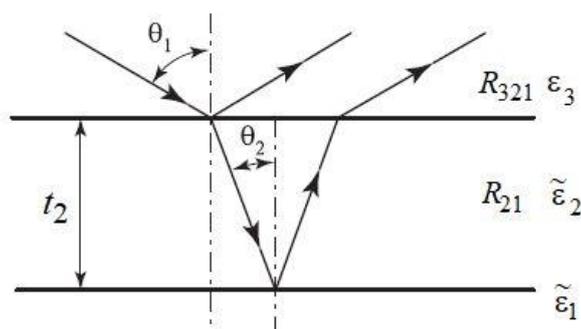


Рис. 2. Геометрия задачи в плоскостойком представлении

В качестве основного недостатка плоскостойких моделей можно отметить тот факт, что в них полагались известными толщина слоя осадков и их электрические параметры. Поскольку на начальном этапе исследований данные параметры определялись методом измерений в месте размещения антенны [13,16] вследствие этого для наледи данный способ становился затратным по времени, а для снега – технически нереализуемым в ММДВ [19].

Приближенная формула для определения толщины водной пленки на поверхности рефлектора с учетом метеорологических особенностей климатического района размещения антенны (зависимость от интенсивности дождя I) получена Гибблом в предположении о ламинарном процессе стекании капель дождя по сферическому обтеканию [3,16]. В системе СИ формула имеет вид:

$$t_2 = \left(\frac{3\mu_k R_0 I}{2g} \right)^{1/3} \text{ [мм]}, \quad (4)$$

где I – интенсивность дождя в [м/с]; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; R_0 – радиус рефлектора [м]; μ_k – кинематическая вязкость воды [21]:

$$\mu_k = \frac{1.78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0337(T - 273) + 0.000221(T - 273)^2} [\text{М}^2/\text{с}], \quad (5)$$

T – температура воздуха в градусах Кельвина.

С учетом традиционно используемой системы измерения интенсивности осадков соотношение (4) принимает вид [22]:

$$t_2 = \sqrt[3]{4.252 \cdot 10^{-5} \mu_k(T) R_0 I'} [\text{мм}], \quad (6)$$

где I' – интенсивность дождя в [мм/ч].

Модернизация данной модели на случай расширения типов водных осадков с учетом особенностей климатического района размещения антенны была получена авторами [6,7] на основе положений теории метеорологического электромагнетизма, объединяющей строгие электродинамические модели с положениями статистической метеорологии [23]. Выбор параметров слоя осадков при этом осуществляется на основе данных статистической метеорологии в предположении о режиме наибольшей степени жесткости, но без учета аномальных климатических явлений. Используемые в [6,7] способы определения электрических параметров снега совпадают с приведенными в [20], однако в отличие от Рекомендаций МСЭ позволяют также связать удельную плотность снега не только с сезоном, а также со временем, прошедшим после выпадения снега. Кроме того, в [6,7] описывается, каким образом на основе статистической метеорологии можно определить толщину наледи и толщину снежного покрова в зависимости от климатического района.

Модели рефлектора со слоем осадков на основе использования метода физической оптики, описываемые в [24-26], позволяют учитывать кривизну рефлектора. Наличие осадков в рефлекторе учитывается способом задания поверхности интегрирования s , а их электрические свойства (ϵ, μ) считаются постоянными [25]:

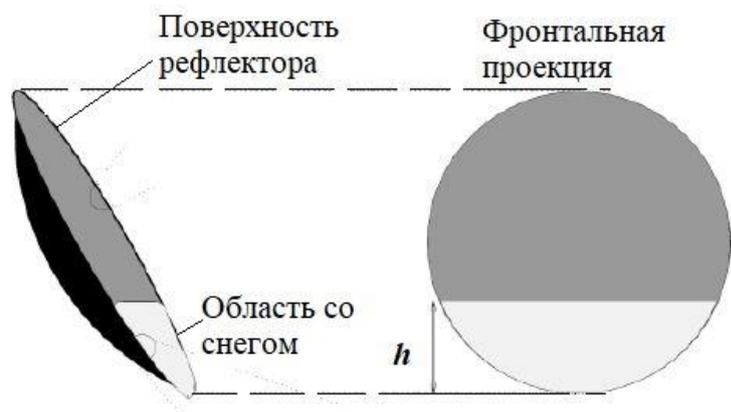
$$\vec{E}(\vec{R}) = B \int_s \frac{E_i}{r} \left[\vec{n} \times (\vec{r} \times \vec{e}_i) \right] \frac{\exp[-jkr(1 - \vec{r} \cdot \vec{R})] \exp(jkR)}{R} ds, \quad (7)$$

где

$$B = -j \frac{\omega \mu P^{1/2}}{(2\pi)^{3/2}} \left(\frac{\varepsilon}{\mu} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

P , E_i - излучаемая мощность и амплитуда падающего электрического поля соответственно; \vec{R} - радиус-вектор от точки начала координат до точки наблюдения в дальней зоне; \vec{r} - радиус-вектор от фокальной точки до произвольной точки на рефлекторе; \vec{e}_i - орт вектора поляризации падающего поля; \vec{n} - орт к поверхности рефлектора; $j = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi f$ - циклическая частота; f - частота передатчика; $k = 2\pi f / c$ - волновое число свободного пространства; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в свободном пространстве; s - внутренняя (освещаемая облучателем) поверхность рефлектора.

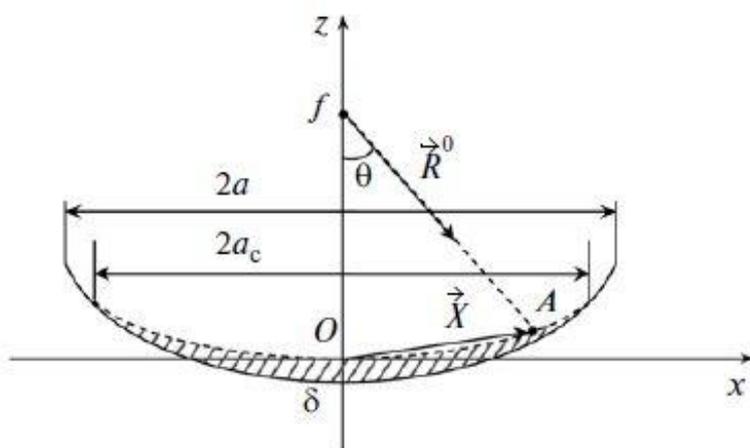
Основными недостатками применения метода физической оптики к решению задачи о нахождении структуры возбуждаемого зеркальной антенной электромагнитного поля, как отмечалось еще в [24], являются большая размерность редуцируемой системы линейных алгебраических уравнений, к которой сводится интеграл (7), а также постоянство электрических свойств поверхности, по которой осуществляется интегрирование. При появлении на металлической поверхности рефлектора слоя водных осадков задача усложняется необходимостью задания закона изменения свойств поверхности. В качестве первых приближений описания геометрических параметров и электрических свойств слоя осадков на криволинейной поверхности стали поверхности постоянной толщины [26] (рис. 3а), а также в виде области переменной толщины, образованной пересечением двух параболоидов вращения (рис. 3в) [5]. Варианты физической реализации данных моделей показаны на рис. 3б и 3г.



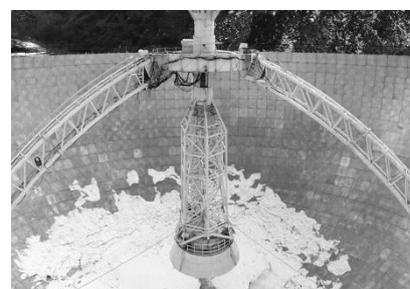
а



б



в



г

Рис. 3. Расположение слоя осадков на рефлекторе:
 а – модель из [26]; б – ее физическая реализация;
 в-модель из [5]; г- ее физическая реализация

Анализ рис. 3 показывает, что известные модели позволяют проводить исследования влияния метеорологических осадков в рефлекторе на характеристики направленности зеркальной антенны только для трех частных случаев распределения осадков по рефлектору: водной пленки по всей поверхности рефлектора и двух вариантов частичного заполнения рефлектора снегом. В последнем случае оценивается заполнение снегом нижней половины зеркала при наклонном положении рефлектора относительно линии горизонта и заполнении центра рефлектора при ориентации антенны в зенит. При описании указанных моделей нет привязки к условиям получения данных вариантов заполнения рефлектора осадками.

Оценка адекватности приведенных на рис. 3 моделей возможна только на основе анализа процессов, протекающих при падении метеорологических осадков на рефлектор.

2. Предлагаемая электродинамическая модель однозеркальной антенны ММДВ с параболическим рефлектором, позволяющая научно обоснованно задавать параметры слоя метеорологических осадков и учитывать их влияние при расчете характеристики направленности

Анализ процессов, протекающих при падении осадков на рефлектор, необходим для оценки адекватности задаваемого распределения слоя осадков на рефлекторе зеркальной антенны с учетом метеорологических условий, соответствующих климатическому району размещения антенны.

В соответствии с [22] при падении дождя на рефлектор зеркальной антенны в зависимости от ее конструктивных особенностей и угла возвышения возможны два варианта прохождения воды по рефлектору:

- стекание по рефлектору без образования в нем лужи;
- стекание по рефлектору с образованием в нем лужи.

Причем в обоих случаях, если поверхность рефлектора не обработана гидрофобным покрытием, образуется водная пленка. При стекании воды на поверхности рефлектора возможно образование либо водной струи; либо водных капель. Лужа воды образуется при углах возвышения антенны $30^\circ \dots 60^\circ$ и имеет круглые границы [22]. При эксплуатации антенны при больших углах возвышения в рефлекторе антенны выполняется отверстие, через которое накапливаемая вода вытекает из рефлектора [27]. Иллюстрация возможных форм водных образований на рефлекторе приведена на рис. 4.



Рис. 4. Форма водных образований на рефлекторе зеркальной антенны: а – в виде струи; б – в виде капель; в – в виде лужи 1 с образованием водной пленки 2

Следует отметить, что образование водной пленки может происходить на поверхности необработанного гидрофобным покрытием рефлектора либо от места падения капли до лужи, как показано на рис. 4в, либо до нижней кромки рефлектора в зависимости от угла возвышения антенны. В первом случае образуется пленка на части поверхности, во втором – сплошная пленка по всей поверхности рефлектора. Толщина пленки, как следует из анализа соотношения (6), зависит от интенсивности дождя и радиуса рефлектора антенны. В табл. 2 сведены данные об измеренной в [28] и рассчитанной с использованием соотношения (6) толщине водной пленки для частных случаев интенсивности дождя ($I' = 10$ мм/ч - небольшой дождь и $I' = 100$ мм/ч – ливень [29]) и двух диаметров рефлекторов (0,6 м и 0,9 м).

Таблица 2. Сравнение результатов вычисления толщины водной пленки на рефлекторе с данными натурального эксперимента

D_a , м	I , мм/час	t , мм		
		измеренные [28]	вычисленные	погрешность расчета, %
0.6	10	0.06	0.061	1.67
	100	0.14	0.131	6.43
0.9	10	0.07	0.07	0
	100	0.16	0.151	5.63

Анализ данных табл. 2 показывает, что погрешность результатов, полученных с использованием приближенной формулы (6), не превышает 6,43 % при $I' = 100$ мм/ч. Для меньшей интенсивности дождя толщина образующейся водной пленки уменьшается (в рассматриваемом примере в два раза) для обоих размеров диаметра рефлектора, а разница между измеренными и вычисленными величинами снижается практически до 0 %.

Вычисленная зависимость толщины водной пленки относительно толщины скин-слоя от интенсивности осадков приведена на рис. 7 из [22]. При проведении исследований полагалось, что диаметр рефлектора равен 0,6 м, угол полураскрыва зеркала составлял $\psi_0 = 75^\circ$. Глубина зеркала при этом составляла 0.115 м, фокусное расстояние – 0.195 м.

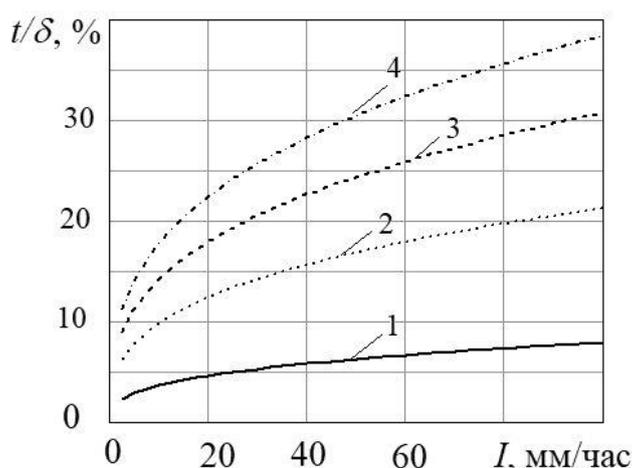


Рис. 5. Зависимость толщины водной пленки относительно толщины скин-слоя от интенсивности осадков на различных частотах:
1 – 10 ГГц; 2 – 30 ГГц; 3 – 60 ГГц; 4 – 90 ГГц

Из анализа рис. 5 следует, что относительная толщина водной пленки для указанного диаметра рефлектора даже на самой высокой частоте из используемых в радиодиапазоне не превышает 40 %. Однако, несмотря на небольшую толщину (не более 10^{-4} м) водной пленки, длительность процесс ее высыхания по данным [30] составит не менее 20 мин. Следствием этого является, во-первых, невыполнение в цифровых системах передачи показателя готовности системы по дождевому фактору (не более 10 с [31]). Во-вторых,

участки с водной пленкой при температурах вблизи 0°C являются центрами образования наледи или прилипания снега к рефлектору [32-36]. Сказанное выше делает актуальным поиск решений по борьбе с водной пленкой. Одним из известных решений является нанесение на поверхность рефлектора (всю или же часть) покрытия из супергидрофобных материалов [32-37].

На основе приведенного анализа процессов, протекающих при падении дождя на рефлектор зеркальной антенны, можно сделать вывод о том, что при падении дождя на необработанный гидрофобным материалом рефлектор на поверхности последнего образуется водная пленка, которая может быть дополнена водной лужей, если антенна ориентирована под углами возвышения $30^{\circ}\dots 60^{\circ}$.

Описание границ водной лужи в рефлекторе.

Известные модели не предусматривают образование в рефлекторе водной лужи наряду с водной пленкой. В связи с этим предлагается модель, соответствующая описанному частному случаю ориентации необработанного гидрофобным материалом рефлектора зеркальной антенны при падении дождя с образованием лужи. Геометрия задачи приведена на рис. 6 из [22].

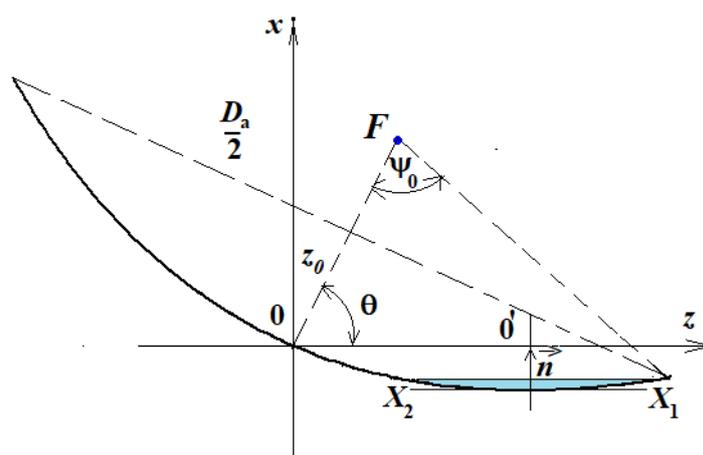


Рис. 6. Геометрия задачи о нахождении границы водного формирования при его накоплении в рефлекторе зеркальной антенны

На рис. 6 введены обозначения: F – фокусное расстояние; ψ – угловой полураскрыв рефлектора; $D_a / 2 = R_0$ – радиус раскрытия рефлектора; θ – угол

возвышения антенны; X_1 , X_2 – точки границы лужи в продольном сечении рефлектора.

Из анализа рис. 6 следует, что лужа формируется симметрично относительно вертикальной строительной оси рефлектора. Под силой тяжести она смещается в нижнюю часть зеркала. Границы зеркала представляют собой окружность и определяются соотношением [22]:

$$y^2 + (x + 2F \sin \theta)^2 = (X_1 - 2F \sin \theta)^2. \quad (9)$$

Положение точки X_1 зависит от нескольких факторов: 1) угла возвышения зеркала θ ; 2) угла полуоткрытия рефлектора ψ_0 ; 3) диаметра рефлектора D_a ; 4) интенсивности дождя I' ; 5) его длительности d_t . Первые три из них определяют возможность сбора воды (т. е. ёмкость рефлектора и его поперечное сечение), а последние два – количество выпавшей на рефлектор воды. В предельном положении ($\theta = 90^\circ$) обеспечивается максимальный сбор воды, а, следовательно, и максимальная глубина лужи:

$$h = t_{\max} = 2R_0 \sqrt{\frac{I' d_t \cdot 10^3}{F}} \quad [\text{мм}]. \quad (10)$$

Координата X_1 вычисляется по формуле:

$$X_1 = 2\sqrt{Fh} = R_0 \sqrt{I' d_t \cdot 10^3} \quad [\text{мм}]. \quad (11)$$

В наклонном, но не предельном положении рефлектора, положение точки X_1 будет определяться меньшим объемом накопленной воды, поскольку площадь поперечного сечения уменьшится в $\sin \theta$ раз. Кроме того, возможность накопления воды будет наблюдаться в зеркале, ордината нижней кромки которого будет выше точки перегиба параболического профиля зеркала, как показано на рис. 6.

Метод нахождения амплитудно-фазового распределения в раскрыве рефлектора со слоем водных осадков в виде лужи.

Для нахождения характеристики направленности зеркальной антенны с осадками в виде водной пленки и лужи предлагается использовать апертурный

метод [24,38]. При этом водную пленку будем представлять как систематическую ошибку, поскольку она равномерно распределена по всей поверхности рефлектора, а слой осадков в виде лужи - как одиночную случайную (статистическую) ошибку в профиле рефлектора с радиусом корреляции, меньшим диаметра зеркала. Для оценки искажений амплитудно-фазового распределения (АФР), вносимых статистической ошибкой, используем модифицированный метод J. Ruze [39-45]. В исходном виде расчет осуществляется для единичного повреждения в приближении метода геометрической оптики. При этом полагается, что в качестве источника излучения выступает точечный облучатель, расположенный в фокусе зеркала. Электрические параметры рефлектора при этом не изменяются. Предлагаемая модификация заключается в допущении, что вследствие появления на всей поверхности рефлектора водной пленки электрические параметры поверхности мокрого рефлектора изменяются, а толщина слоя осадков будет различной: на всех участках, кроме лужи, толщина пленки будет одинаковой и может быть вычислена с использованием соотношения (6). Лужа же является аналогом выпуклой деформации, а ее размещение в силу физических причин ограничено нижним сектором рефлектора, причем симметрично относительно строительной оси.

Далее исключим из анализа хода лучей влияние систематических ошибок, поскольку искажения будут одинаковыми для всех точек, в которых имеется водная пленка. В связи с этим построение хода прямого и отраженного лучей будем проводить только от границ деформированного участка профиля, соответствующего луже. В результате построений в апертуре зеркала можно выделить три характерные области, показанные на рис. 7: 1 - периферийная зона (зона лучей, отраженных от рефлектора с водной пленкой); 2 - центральная область (зона лучей, отраженных только от области лужи); 3 - область интерференции (суперпозиция лучей, отраженных от зон 1 и 2).

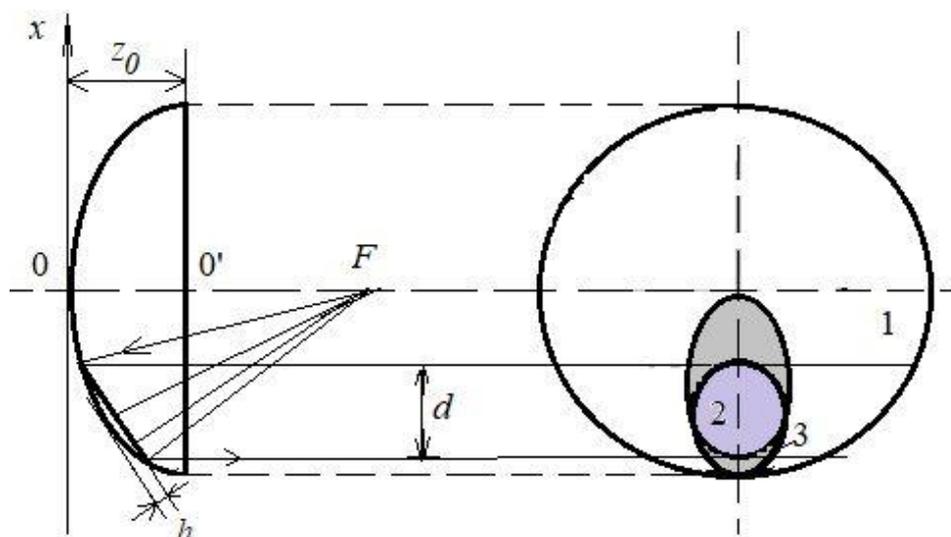


Рис. 7. Структура характерных областей на апертуре при образовании лужи в рефлекторе: 1 - периферийная зона (зона лучей, отраженных от рефлектора с водной пленкой); 2 - центральная область (зона лучей, отраженных только от области лужи); 3 - область интерференции (суперпозиция лучей, отраженных от зон 1 и 2)

Следует отметить, что для удобства анализа рис. 6 повернут по часовой стрелке на угол 90° . В результате этого горизонтальная поверхность лужи с проекцией диаметра $d = (X_2 - X_1) \sin \theta$ и глубиной h в рефлекторе глубиной z_0 представляется наклонной. Положение области 3 на рис. 7 определялось с учетом ее выпуклости. В этом случае, как показано в [39], смещение осуществляется в противоположную от области деформации сторону.

Далее определяются амплитудное (АР) и фазовое (ФР) распределения поля в раскрыве, а также их взаимосвязь с геометрическими параметрами повреждений (высотой/глубиной повреждения h и проекцией диаметра $d = (X_2 - X_1) \sin \theta$). Для выделенных областей вычисляются фазовые ошибки δ , обусловленные изменением профиля рефлектора и его электрических свойств. В результате распределение вектора напряженности электрического поля в дальней зоне, на основе которой рассчитывается характеристика направленности, будет определяться соотношением [40]:

$$E(\vec{R}) = \int_s Q(\vec{r}) \exp(jk\vec{r}\vec{R}) \exp(j\delta) ds, \quad (12)$$

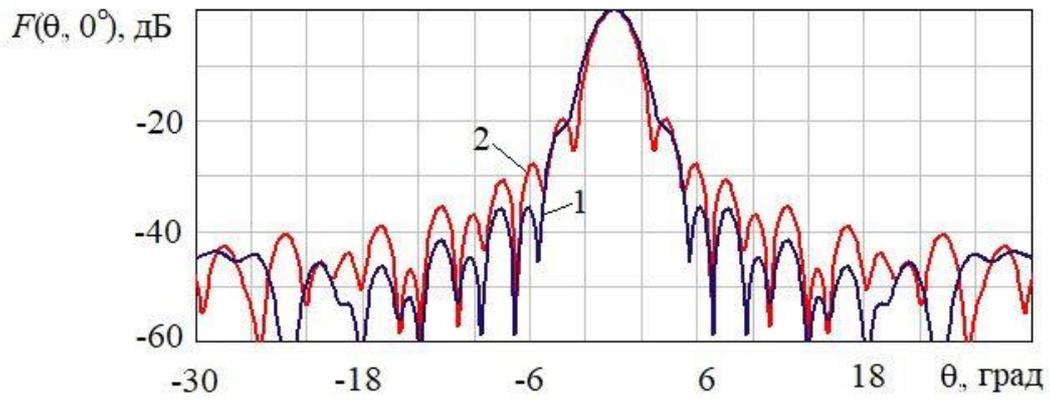
где \vec{R} - радиус-вектор от точки начала координат до точки наблюдения в дальней зоне; \vec{r} - радиус-вектор от фокальной точки до произвольной точки на рефлекторе; $Q(\vec{r})$ - АР в точке, определяемой радиус вектором \vec{r} ; $\exp(jk\vec{r}\vec{R})$ -ФР в раскрыве без искажения; $\exp(j\delta)$ - искажение δ фазы.

Достоинством предложенного метода расчета характеристики направленности зеркальной антенны со слоем осадков в виде лужи в рефлекторе является снижение вычислительных затрат при проведении исследований за счет распараллеливания процесса нахождения вклада в АФР выделенных характерных областей, а также физической трактовки получаемых результатов. Недостатки предложенного метода аналогичны недостаткам апертурного метода, т. е. не позволяют учитывать эффекты дифракции первичного поля облучателя на кромке зеркала, а также поляризационные эффекты. В то же время для устранения последнего недостатка возможно использование модифицированного апертурного метода расчета зеркальной антенны, предложенного в [46].

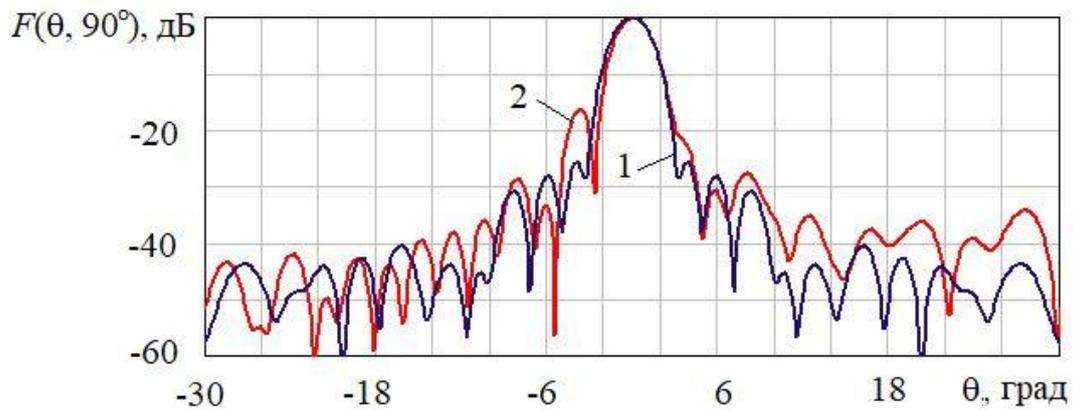
3. Исследование влияния слоя осадков в виде лужи на диаграмму направленности однозеркальной антенны ММДВ

С использованием разработанной модели необработанного гидрофобными материалами рефлектора зеркальной антенны, диаметром 0,2 м и функционирующей на частоте 40 ГГц, были проведены исследования влияния осадков в виде лужи глубиной $4 \cdot 10^{-3}$ м на характеристики направленности антенны. Диаметр лужи полагался равным $5 \cdot 10^{-2}$ м, толщина водной пленки принималась равной $4 \cdot 10^{-5}$ м, а угол возвышения – 40 град. Угол полураскрыва рефлектора составлял $\psi_0 = 75$ град.

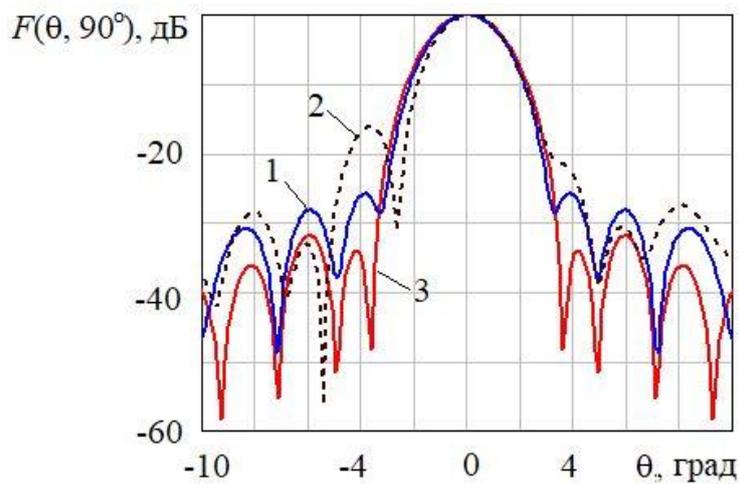
Результаты вычислительного эксперимента приведены на рис. 8. Для удобства сравнения результаты нормированы.



а



б



в

Рис. 8. Главные сечения диаграммы направленности зеркальной антенны с осадками в виде лужи:

1 – рефлектор только с водной пленкой; 2 – рефлектор с водной пленкой и лужей; 3 – рефлектор без осадков

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- наличие одной водной пленки на рефлекторе зеркальной антенны приводит к общему снижению уровня излучаемого поля. Для заданных параметров водной пленки потери, как следует из рис. 8в, составили 7,6 дБ, что примерно соответствует результатам экспериментальных данных, приведенных на рис. 1;

- появление в рефлекторе лужи приводит к асимметричному изменению амплитудно-фазового распределения, как показано на рис. 6. Вследствие этого диаграмма направленности антенны в сечении $\varphi = 90^\circ$ (рис. 8б) искажается, что проявляется в асимметрии первых боковых лепестков. Данное различие составляет порядка 8 дБ. По сравнению с вариантом только водной пленки различие достигает 10,7 дБ;

- несимметричное влияние лужи проявляется только в одном сечении $\varphi = 90^\circ$, поскольку область 3 представляет собой овал, вытянутый по вертикали. В сечении $\varphi = 0^\circ$ (рис. 8а) влияние лужи проявляется в росте уровня боковых лепестков, кроме первого. Симметрия лепестков при этом не нарушается.

Заключение

Необходимость оценки влияния метеорологических осадков на характеристики излучения зеркальных антенн миллиметрового диапазона длин волн обусловлена двумя факторами: практической необходимостью перехода в миллиметровый диапазон длин волн, в котором имеют место существенные потери энергии электромагнитной волны в гидрометеорах, а также экономической нецелесообразностью устанавливать радиопрозрачные укрытия для антенн, функционирующих в не экстремальных условиях.

Применение при проектировании зеркальных антенн численно-аналитических методов вследствие отсутствия строгих методов описания процесса излучения зеркальных антенн делает необходимым наличие модели, описывающей геометрию рефлектора зеркальной антенны со слоем осадков в рефлекторе.

Выполненный анализ известных моделей зеркальных антенн со слоем осадков в рефлекторе, а также процессов, наблюдаемых при падении дождя на рефлектор, показали, что отсутствует модель рефлектора зеркальной антенны, в котором одновременно находятся водная пленка и лужа воды.

При оценке влияния осадков в рефлекторе в виде водной пленки и лужи воды на характеристики направленности предложено использовать апертурный метод, в котором для описания влияния водной лужи на амплитудно-фазовое распределение в апертуре используется модифицированный метод Ruze с четко фиксированной областью деформации профиля рефлектора.

Предложенный подход за счет возможности разбиения поля в апертуре на три характерные области позволяет давать физическую трактовку наблюдаемым следствием появления слоя осадков искажениям в диаграмме направленности зеркальной антенны.

Выполненные исследования показали, что появление в лужи приводит к несимметричному изменению уровня первых боковых лепестков диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Данное различие составляет порядка 8 дБ. По сравнению с вариантом только водной пленки различие достигает 10,7 дБ. В горизонтальной плоскости изменения наблюдаются в виде роста уровня боковых лепестков, кроме первого. Симметрия лепестков при этом не нарушается.

Результаты исследований могут быть полезны при разработке зеркальных антенн миллиметрового диапазона длин волн для оценки влияния метеорологических осадков на характеристики направленности.

Литература

1. Skolnik M.I. *Radar Handbook*. 3rd ed. 2008. New York, McGraw-Hill. 1352 p.
2. Kurri M., Huuskonen A. Measurement of the transmission loss of a radome at different rain intensities. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 2008. V.25. P.1590-1599. <https://dx.doi.org/10.1175/2008JTECHA1056.1>

3. Ain M.F., Hassan S.I.S., Marzuki A., Ab Rahman I.I., Norhassim K.A., Arifen N.A.M., Zahar Z. Measurement of wet offset parabolic antenna at Ka-band with different elevation angles. *ELEKTROPIKA: International Journal of Electrical, Electronic Engineering and Technology*. 2012. V.2. P.47-56.
4. Mom J., Tyokighir S., Igwue G. Evaluation of some raindrop size distribution models for different rain rates. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2021. V.10. <https://doi.org/10.17577/IJERTV10IS090075>
5. Сухаревский О.И., Нечитайло С.В., Хлопов Г.И., Войтович О.А. Влияние снежного покрова на характеристики излучения рефлекторных антенн. *Радиотехника и электроника*. 2015. Т.60. №6. С. 633-641. <https://dx.doi.org/10.7868/S0033849415060157>
6. Zvezdina M.Yu., Shokova Yu.A., Shaposhnikova A.M. Chrekesova L.V. Climate Factors Impact on Millimetre Antenna Losses. *Proceeding of International Scientific Conference "Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves – RSEMW 2021". Gelendzhik District, Divnomorskoe*. 2021. P. 349-352. <https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494012>
7. Звездаина М.Ю., Шапошникова А.М., Шокова Ю.А. Влияние климатических факторов на потери электромагнитной волны миллиметрового диапазона при прохождении через слой осадков на рефлекторе зеркальной антенны. *Радиотехника*. 2021. №7. С.98-107. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202107-14>
8. Якимов А.Н. *Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий*. Пенза, Изд-во ПГУ. 2004. 206 с.
9. Huang J., Cao Y., Raimundo X., Cheema A., Salous S. Rain statistics investigation and rain attenuation modeling for millimeter wave short-range fixed links. *IEEE Access*. 2019. V.7. P.156110-156120. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949437>
10. Yusuf A.A., Falad eA., Olufeagba B.J., Mohammed O.O., Rahman T.A. Statistical Evaluation of measured rain attenuation in tropical climate and comparison with

- prediction models. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2016. V.15. №2. <https://doi.org/10.1590/2179-10742016v15i2624>
11. Daoud N., Christodoulou C., Murrell D., Tarasenko N., Hong E., Lane S. Rain attenuation analysis at 84 GHz. *Proceeding of IEEE International Symposium "On Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting"*. San-Diego, California. 2017. P.1629-1630. URL: <https://10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072857>
12. Kharadly M.M.Z., Ross R. Effect of wet antenna attenuation on propagation data statistics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2001.V.49. №8. P. 1183-1191. <https://doi.org/11.1109/8.943313>
13. Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов Г.С. *Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков*. Москва, Мир. 2022. 368 с.
14. Solomatin S.V., Rozanov S.B., Kropotkina E.P., Lukin A.N. Techniques of ground-based remote sensing of the ozone layer by millimeter-wave heterodyne spectroscopy. *Proceeding of SPIE*. 1998. V.3406. P.135-157. <https://doi.org/10.1109/MCMB.1998.758918>
15. Patent USA № 9680230B1. Santoru J., Chen E.C., Comeaux C.C., Wu T. *Antenna reflector hydrophobic coating and method for applying same*. Application Date: 29.06.2015. Publication Date: 13.06.2017. 21 p. URL: <https://patents.google.com/patent/US9680230>
16. Blevis B.C. Losses due to rain on radomes and antenna reflecting surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1965. V.13. №1. P.175-176. <https://doi.org/10.1109/TAP.1965.1138384>
17. Jacobson M.D., Hogg D.C., Snider J.B. Wet reflector in millimeter-wave radiometry – Experiment and Theory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1986. V.24. №5. P.784-791. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1986.289627>
18. Николаев П.В., Самбуров Н.В. Радиопрозрачные укрытия на основе листового фторопласта. *Вопросы радиоэлектроники*. 2016. №10. С.77-84.

19. Голунов В.А., Кузьмин А.В., Скулачев Д.И., Хохлов Г.И. Экспериментальные спектры ослабления, рассеяния и поглощения миллиметровых волн в сухом свежеснеге. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2016. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep16/4/text.html>
20. Recommendation ITU-R P.527-6 (09/2021). *Electrical characteristics of the surface of the Earth*. Geneva, ITU. 2021. 32 p.
21. Седов Л.И. *Механика сплошной среды. Т.1*. Москва, Наука. 1970. 492 с.
22. Звездина М.Ю., Шапошникова А.М., Шокова Ю.А. Математическая модель процесса накопления воды в рефлекторе зеркальной антенны миллиметрового диапазона длин волн. *Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2022)*. Воронеж. 2022. Т.5. С.131-144.
23. Notaroš V.M. Meteorological electromagnetics. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2021. P.14-27. <https://doi.org/10.1109/MAP.2021.3054298>
24. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. *Антенны УКВ. В 2-х ч. Ч.1*. Москва, Связь. 1977. 384 с.
25. Liu Y., Huang F., Zhang Q., Yuan J., Dong T. Calculations of radiation characteristics of reflector antennas with surface deformation and perforation. *Computers and Mathematics with Applications*. 2011. V.61. P.2348-2352. <https://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2010.10.007>
26. Ip H.P., Rahmat-Samii Y. Analysis and characterization of multilayered reflector antennas: rain/snow accumulation and deployable membrane. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1998. V.46. P.1593-1605. <https://doi.org/10.1109/8.736606>
27. Patent USA № 2679004A. Dyke E., Hoffman Jr. R. Y. *Snow detector and heater system for microwave antennas*. Application Date: 21.12.1951. Publication Date: 19.05.1954. 21 p. URL: <https://patents.google.com/patent/US2679004A/en>
28. Mancini A., Salazar J.L., Lebrón R.M., Boon L.C. A novel instrument for real-time measurement of attenuation of weather radar radome including its outer surface.

Part II: Applications. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 2018. V.35. №5. P.975-991.

29. *Наставления по службе прогнозов*. Москва, Гидрометеиздат. 1981. 56 с.
30. Дохов М.П. Расчет времени испарения дисперсных частиц. *Фундаментальные науки*. 2006. №10. С.65-66.
31. Жиров В.А., Зайцев С.Г., Орлов А.Е. Эффективность использования частотно-энергетического ресурса в перспективных высокоскоростных спутниковых системах связи. *Электросвязь*. 2019. №1. С.42-51.
32. Gang W.Z., Zhu F., Zhu L., Tao W.-Q., Yang C. Self-peeling of frozen water impacting a cold surface. *Communications Physics*. 2022. <https://doi.org/10.1038/s42005-022-00827-0>
33. He Z., Zhuo Y., Zhang Z., He J. Design of icephobic surfaces by lowering ice adhesion strength: A mini review. *Coatings*. 2021. №11. Article ID 1343. 26 p. <https://doi.org/10.3390/coatings11111343>
34. Rodie P., Kapun B., Panjan M., Milošev I. Easy and fast fabrication of self-cleaning and anti-icing perfluoroalkyl silane film on aluminium. *Coatings*. 2020. №10. Article ID 234. <https://doi.org/10.3390/coatings110030234>
35. Логанина М.И. Исследование кинетики замерзания капли воды на супергидрофобной поверхности покрытий. *Вестник МГСУ*. 2019. Т.14. №4. С.435-441. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.4.435-441>
36. Шилова О.А., Цветкова И.Н., Красильникова Л.Н., Ладиллина Е.Ю., Любова Т.С., Кручинина И.Ю. Синтез и исследование супергидрофобных антиобледенительных гибридных покрытий. *Транспортные системы и технологии*. 2015. Т.1. №1. С.91-98.
37. Patent USA № 7342551 B2. King L.D. *Antenna systems for reliable satellite television reception in moisture conditions*. Application Date: 13.10.2004. Publication Date: 11.03.2008. 21 p. URL: <https://patents.google.com/patent/US7342551B2/en>
38. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. *Антенно-фидерный устройства*. Москва, Сов. Радио. 1974. 536 с.

39. Ruze J. The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern. *Nuovo Cimento*. 1952. V.9. №3. P.364-380. <https://doi.org/10.1007/BF02903409>
40. Cheng S.X., Duan B.Y., Song L.W., Zhang X.H.A. A handy formula for estimating the effects of random surface errors on average power pattern of distorted reflector antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2019. V.67. №1. P.649-653. <https://dx.doi.org/10.1109/TAP.2018.28798298>
41. Assis A.R., Moreira F.J.S., Bergmann J.R. GO synthesis of offset dual reflector antennas using local axis-displaced confocal quadrics. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2020. V.19. №2. P.177-190. <https://dx.doi.org/10.1590/2179-10742020v19i2813>
42. Zhang S., Yang G., Zhang Y. An approximation mathematical formula of pattern analysis for distorted reflector antennas considering surface normal vector variation. *International Journal of Antennas and Propagation*. 2016. V.2016. Article ID 4824873. <https://dx.doi.org/10.1155/2016/4824873>
43. Moreira F.J.S., Bergmann J.R. Shaping axis-symmetric dual-reflector antennas by combining conic sections. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2011. V.59. №3. P.1042-1046. <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2103028>
44. Лаврецкий Е.И., Чернышов В.С. Исследование влияния регулярных фазовых ошибок на характеристики зеркальной параболической антенны с электрическим сканированием. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2015. №3. URL: <http://www.jre.cplire.ru/mar15/11/text.html>
45. Лаврентьева А.С., Морозов О.А., Чуманкин Ю.Е. Определение параметров диаграммы направленности при сложных деформациях рефлектора зеркальной антенны. *Системы управления и информационные технологии*. 2020. №3(81). С. 31-35.
46. Соболев Б.С., Новиков С.И. Модифицированный апертурный метод расчета зеркальных антенн. *Ракетно-космическая техника*. 2014. Т.1. №1(4). С. 10-14.

Для цитирования:

Звезда М.Ю., Шапошникова А.М., Шокова Ю.А., Федоров Д.С. Особенности построения модели зеркальной антенны с учетом влияния метеорологических факторов. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.9>