

## Влияние капель воды на поверхности RIS на ее характеристики<sup>1</sup>

С.С. Тронин<sup>\*,\*\*\*</sup>, А.С. Тярин<sup>\*,\*\*\*</sup>, А.А. Куреев<sup>\*,\*\*</sup>, Е.М. Хоров<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

<sup>\*\*</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

<sup>\*\*\*</sup>Московский физико-технический институт

Поступила в редколлегию 01.12.2024 г. Принята 19.12.2024 г.

**Аннотация**—Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (англ.: Reconfigurable Intelligent Surfaces, RISs) являются устройствами периодической структуры для увеличения пропускной способности и области покрытия беспроводных сетей. При внедрении в беспроводные системы связи данные устройства столкнутся с влиянием погодных условий, например, дождя, что может привести к некорректной работе. В данной работе исследуются зависимости амплитудно- и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) RIS, а также потерь мощности отраженного от RIS сигнала от интенсивности дождя для ячеек RIS с рабочей частотой 4,8 ГГц. Для этого предложен метод расчета влияния капель воды на поверхности RIS на ее ФЧХ и АЧХ. Результаты показали, что при интенсивности дождя менее 35 мм/ч потери мощности отраженного от RIS сигнала не превышают 3 дБ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** RIS, PIN-диод, капли дождя, CST Microwave Studio.

**DOI:** 10.53921/18195822\_2024\_24\_4\_373

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные беспроводные сети предъявляют требования высокой надежности, скорости и плотного покрытия [1, 2], что приводит к необходимости увеличения данных параметров. Решить данную задачу призвана реконфигурируемая интеллектуальная поверхность (англ.: Reconfigurable Intelligent Surface, RIS), являющаяся плоской периодической структурой, состоящей из элементарных ячеек (англ.: Unit Cells, UCs), электромагнитным (ЭМ) откликом которых можно управлять. ЭМ отклик описывается фазо- и амплитудно-частотными характеристиками (ФЧХ и АЧХ) UC [3]. Меняя состояние каждой UC, и, соответственно, ее ФЧХ и АЧХ, можно добиться, например, фокусирования сигнала на принимающем устройстве, тем самым увеличить мощность принимаемого сигнала на нем [4]. Для определения, в каком состоянии должна находиться каждая UC для достижения необходимой манипуляции над ЭМ волной, используются различные алгоритмы настройки RIS [5–8].

Предполагается, что RIS будет использоваться как внутри, так и вне помещений, где она может быть подвержена влиянию погодных условий, например, дождя. Капли дождя, оставшиеся на поверхности UC, могут привести к изменению ее ФЧХ и АЧХ и, как следствие, некорректной работе алгоритма настройки RIS [5].

На сегодняшний день влияние капель дождя на UC не изучено, однако существуют статьи [9–13], в которых исследуется влияние факторов окружающей среды на устройства, имеющие схожую с UC структуру. В работах [9–11] рассматривается влияние капель дождя, находящихся в воздухе, на каналные условия, однако не рассматривается отдельно влияние

<sup>1</sup> Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

воды, находящейся на поверхности принимающих или передающих устройств. Данная задача решается в работах [12, 13] для радара и патч-антенны соответственно. Например, в работе [12] показано, что наличие капель дождя на поверхности радара, имеющего периодическую структуру, снижает мощность отраженного от поверхности радара сигнала на 2-6 дБ в диапазоне 2,6–3,45 ГГц. Авторы [13] приходят к выводу, что наличие сплошных слоев воды, пыли и льда на поверхности патч-антенны уменьшает резонансную частоту патч-антенны. Однако ни в одной из вышеперечисленных статей не рассматривается влияние капель воды на ФЧХ, которая является важной характеристикой УС RIS, что не позволяет использовать результаты работ [9–13].

Целью данной работы является определение зависимости потерь отраженного от УС сигнала, вызванных наличием капель воды на поверхности УС, от интенсивности дождя. Для этого создана модель УС в среде ЭМ анализа CST, оценено распределение диаметра капель на поверхности УС при различных интенсивностях дождя. Также разработан метод расчета АЧХ и ФЧХ УС с каплями на ее поверхности и определены изменения АЧХ и ФЧХ УС при различных интенсивностях дождя. Более того, определены значения интенсивности дождя, при которых необходимо вносить поправки в алгоритм [5] настройки RIS. Помимо прочего, в данной работе предлагается метод расчета влияния капель воды на АЧХ и ФЧХ УС.

Данная работа имеет следующую структуру. В разделе 2 описывается архитектура УС с каплями на ее поверхности, а также без капель в CST. В разделе 3 описывается метод определения количества капель воды на поверхности УС. В разделе 4 описывается метод расчета АЧХ и ФЧХ УС при наличии на ней капель воды. В разделе 5 приводятся численные результаты. Наконец, в разделе 6 подводятся итоги работы.

## 2. АРХИТЕКТУРА УС

В данной работе исследуется RIS с однобитным квантованием по фазе, реализованным с помощью PIN-диода. То есть, УС может находиться в двух состояниях (ON и OFF), при этом разность фазовых сдвигов УС между состояниями PIN-диода на рабочей частоте, которая в данной работе равна 4,8 ГГц, равняется  $180^\circ$  [14]. УС, исследуемая в данной работе, имеет рабочую полосу шириной 100 МГц, на краях которой разность сдвигов фаз УС при различных состояниях PIN-диода составляет  $160^\circ$ . В состоянии ON на PIN-диод подается управляющее напряжение 5 В, а в состоянии OFF на PIN-диод управляющее напряжение не подается.

Исследуемая УС, структура которой показана на рис. 1(а), моделируется в CST. Нижний слой, патч и проводящие соединения металлические. Патч и нижний слой разделены диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_p$  и тангенсом угла потерь  $\delta_p$ .

Длина стороны квадратной УС  $a$ , при которой минимизируется взаимное влияние УС друг на друга, а также максимизируется диапазон углов отражения, равна  $\frac{\lambda}{2}$ , где  $\lambda$  — длина ЭМ волны на рабочей частоте [15]. Длина и ширина стороны патча  $b_w \approx b_l \approx \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_p}}$  [16]. В исследуемой УС для реализации однобитного квантования используется PIN-диод с индуктивностью  $L_{OFF}$ , емкостью  $C_{OFF}$  в состоянии OFF, сопротивлением  $R_{ON}$  и индуктивностью  $L_{ON}$  в состоянии ON.

Для учета влияния капель на характеристики УС будем считать, что каждая капля представляет собой полусферу из воды. Она располагается на поверхности УС, где координаты ее центра обозначаются  $l_{center}$  и  $w_{center}$  (см. рис. 1(б)).

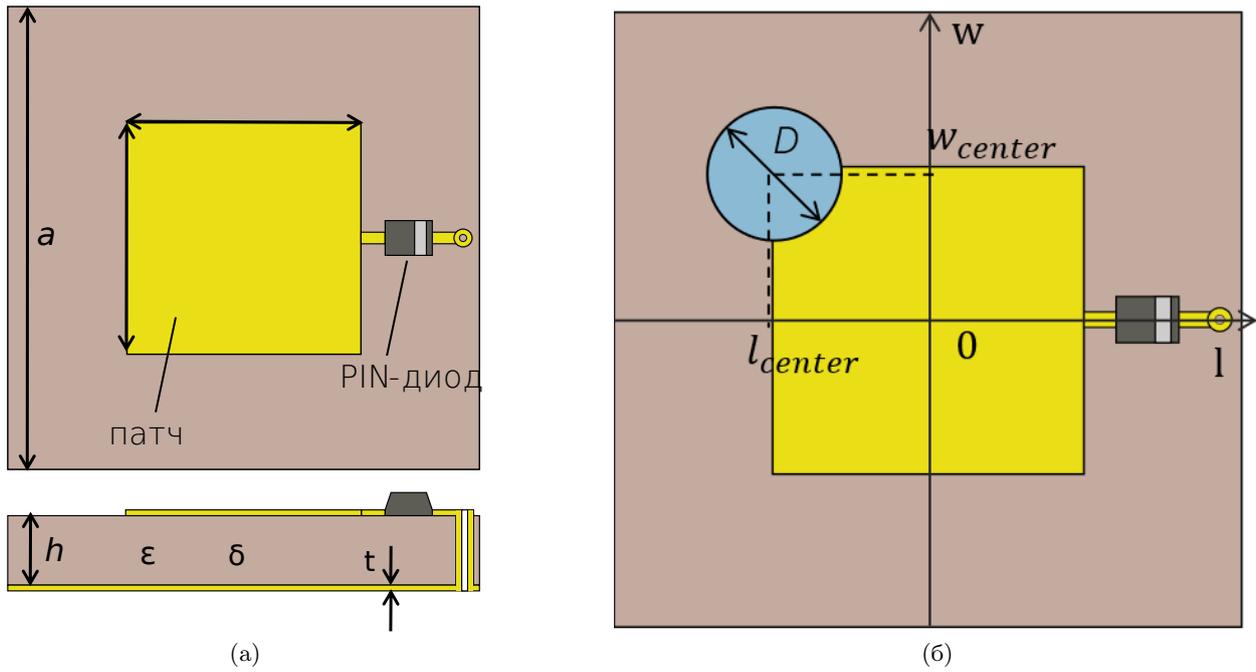


Рис. 1. Структура УС без капель воды (а) и вид сверху на модель УС с каплей воды (б).

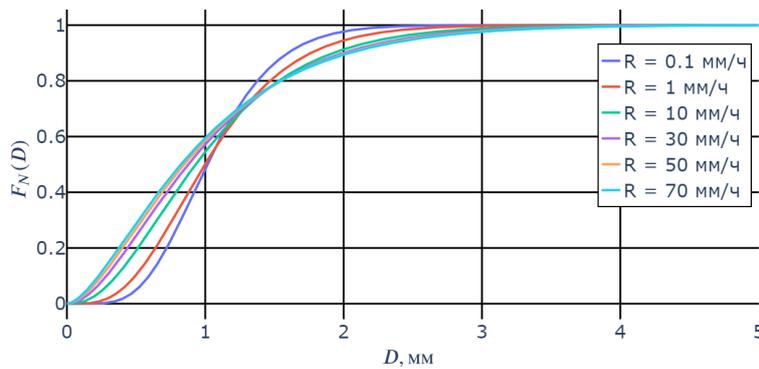


Рис. 2. Кумулятивная функция распределения диаметра капель для различных значений R.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА КАПЕЛЬ НА УС

Падение капель воды на поверхность УС является сложным случайным процессом [17], однако количество капель каждого диаметра на поверхности УС можно определить с помощью распределения диаметра капель дождя  $N(D)$ , описанного в работе [12], и представленного в виде выражений (1 - 3):

$$N(D, R) = N_0 D^u \exp(-\Lambda D), \tag{1}$$

$$\Lambda = 4,1 R^{-0,21}, \tag{2}$$

$$u = -0,016 \Lambda^2 + 1,213 \Lambda - 1,957, \tag{3}$$

где  $R$  — интенсивность дождя в мм/ч,  $N_0 = 8000$  — константа, полученная при моделировании,  $D$  — диаметр капли в мм. На рис. 2 показан график кумулятивной функции распределения диаметра капель, на котором видно, что максимальный диаметр капли  $D_{max} = 5$  мм (вероятность встретить каплю диаметром более 5 мм не превышает 0,1%).

Также в [12] представлены выражения, которые, заменив площадь радара на площадь УС, можно адаптировать для расчета количества капель воды  $n_R$  каждого диаметра  $D$  на поверхности УС  $n_R(D)$  (4, 5):

$$n_R(D, R) = N(D, R)A_u v(D)T\Delta D \cos(\theta), \quad (4)$$

$$v(D) = 386,6D^{0,67}, \quad (5)$$

где  $A_u$  — площадь УС в  $\text{м}^2$ ,  $T$  — время установления стационарного режима, при котором распределение диаметра капель становится независимым от времени (1) в секундах,  $\Delta D$  — шаг дискретизации диаметра в мм,  $\theta$  — угол наклона УС.

Авторы статьи [12] приходят к выводу, что по истечении 10 минут распределение диаметра капель становится стационарным, поэтому  $T = 600$  с. В течение этого времени влияние капель воды будет увеличиваться до стационарного значения неопределенным образом, поэтому в данной статье будет рассматриваться стационарный режим работы RIS. Согласно работе [12] можно определить  $\theta = 89^\circ$  для вертикального положения RIS.

#### 4. МЕТОД РАСЧЕТА АЧХ И ФЧХ

Наличие капель воды на поверхности УС приводит к сдвигу ФЧХ УС в обоих состояниях, при этом изменения АЧХ и формы ФЧХ незначительны, что будет показано в численных результатах, и ими можно пренебречь. Метод расчета ФЧХ и АЧХ УС с каплями дождя, находящимися на ее поверхности, предложенный в данной работе, основывается на принципе аддитивности сдвигов резонансных частот. Этот принцип состоит в том, что сдвиг резонансной частоты, вызванный наличием нескольких капель на поверхности УС, равен сумме сдвигов резонансной частоты, вызванных наличием на поверхности УС каждой капли в отдельности. Предложенный метод заключается в следующем. Сначала рассчитывается влияние одной капли при различных  $D$ ,  $l_{center}$  и  $w_{center}$ , а также определяются резонансные частоты УС без капель в обоих состояниях. Под резонансной частотой будем понимать частоту, в которой находится минимум АЧХ. Далее определяется пороговый диаметр  $D_{lim}$  и отдельно рассчитываются сдвиги резонансных частот, вызванных каплями диаметром больше и меньше  $D_{lim}$  для обоих состояний УС. После, используя аддитивность сдвигов резонансных частот, вычисляются сдвиги резонансных частот для каждого состояния УС, вызванные всеми каплями. При помощи сдвига ФЧХ УС без капель на суммарные сдвиги резонансных частот рассчитывается ФЧХ УС с каплями на ее поверхности. Далее рассчитываются суммарные потери мощности сигнала, отраженного от RIS, вызванные наличием на ее поверхности капель воды.

Первым шагом является расчет влияния одной капли на ФЧХ и АЧХ исследуемой УС при различных  $w_{center}$ ,  $l_{center}$  и  $D$ . Расчет выполняется в CST при периодических граничных условиях, используя метод конечных элементов на тетрагональной сетке («Frequency Domain Solver»). Ввиду наличия случайности при построении сетки и погрешности при решении уравнений Максвелла на ней присутствует погрешность определения фазы и частоты при расчете ФЧХ и АЧХ УС. Для определения погрешности один и тот же эксперимент запускается более 20 раз, полученные значения фазы и частоты усредняются и рассчитываются максимальные отклонения фазы и частоты от средних значений. Полученные максимальные отклонения являются погрешностями определения фазы и частоты.

Вторым шагом определяется пороговый диаметр  $D_{lim}$  капли. Он равен минимальному значению  $D$ , при котором максимальное значение сдвига резонансной частоты в обоих состояниях превышает интервал погрешности.  $D_{lim}$  определяется таким образом, поскольку в таком случае можно утверждать, что наблюдаемый сдвиг вызван влиянием одной капли, а не погрешностью измерения. Поэтому влияние капель с  $D < D_{lim}$  и  $D > D_{lim}$  рассчитываются по-разному.

Третьим шагом рассчитывается сдвиг резонансной частоты  $\Delta f_{low}$ , вызванный каплями с  $D < D_{lim}$ . При  $D_{lim} > 1$  мм диапазон  $[0; D_{lim}]$  разбивается на промежутки  $[0; 1 \text{ мм}]$  и  $[1 \text{ мм}; D_{lim}]$ . В свою очередь,  $[1 \text{ мм}; D_{lim}]$  разбивается на промежутки с шагом  $\Delta D_{low}$ , на каждом из которых капли заменяются на капли с максимальным или минимальным диаметром на данном промежутке. Диапазон  $[0; 1 \text{ мм}]$  рассматривается отдельно, поскольку влияние капель диаметром менее 1 мм мало. Таким образом, диапазон  $[0; D_{lim}]$  разбивается на промежутки  $[D_j; D_{j+1}]$ , где  $j$  — номер промежутка, причем  $D_1 = 0, D_2 = 1, D_3 = 1 + \Delta D_{low}, D_4 = 1 + 2 \cdot \Delta D_{low}$  и т. д. При  $D_{lim} < 1$  мм диапазон  $[0; D_{lim}]$  не разбивается на промежутки, то есть  $D_1 = 0, D_2 = D_{lim}$ . При этом количество капель диаметром в диапазоне  $[D_j; D_{j+1}]$  рассчитывается с помощью распределения числа капель (4) следующим образом:

$$N_j = \int_{D_j}^{D_{j+1}} n_R(D, R) dD, \quad (6)$$

где  $N_j$  — количество капель диаметром от  $D_j$  до  $D_{j+1}$  на поверхности УС. Далее для увеличения точности рассчитывается влияние  $N_{sim} = 100$  случайно расположенных капель максимального или минимального диаметра для каждого промежутка, полученные результаты усредняются. Данная операция проводится для того, чтобы оценить сверху и снизу сдвиги резонансных частот, вызванные наличием капель с  $D < D_{lim}$  на поверхности УС. Далее рассчитываются сдвиги резонансной частоты  $\Delta f_j$ , вызванные наличием капель диаметром  $[D_j; D_{j+1}]$ . При выполнении принципа аддитивности сдвигов резонансной частоты УС для каждого состояния, который будет доказан с помощью моделирования в разделе численных результатах,  $\Delta f_j$  и  $\Delta f_{low}$  могут быть вычислены по следующим формулам (7-8):

$$\Delta f_j = \Delta f_j^{sim} \frac{N_j}{N_{sim}}, \quad (7)$$

где  $\Delta f_j^{sim}$  — сдвиг резонансной частоты, вызванные наличием  $N_{sim}$  капель на поверхности УС.

$$\Delta f_{low}(R) = \sum_j \Delta f_j. \quad (8)$$

$\Delta D_{low}$  уменьшается до тех пор, пока погрешность измерения  $\Delta f_{low}$  не будет превышать погрешность измерения частоты.

Четвертым шагом является расчет влияния капель с  $D > D_{lim}$ . Из диапазона  $[D_{lim}; D_{max}]$  выбирается дискретный набор диаметров, для каждого диаметра из которого рассчитываются средние сдвиги резонансных частот УС в положениях ON и OFF. Полученные зависимости средних сдвигов резонансной частоты  $\Delta f$  от диаметра капли аппроксимируются многочленами, тем самым получаются непрерывные зависимости сдвигов резонансной частоты от диаметра капли  $\Delta f_{high}(D)$ . Далее рассчитываются суммарные сдвиги резонансной частоты, вызванные всеми каплями с  $D > D_{lim}$  для обоих состояний:

$$\Delta f_{high}(R) = \int_{D_{lim}}^{D_{max}} \Delta f(D) n_R(D, R) dD. \quad (9)$$

Суммарный сдвиг резонансных частот УС в обоих состояниях можно выразить следующим образом:

$$\Delta f_{all}(R) = \Delta f_{low}(R) + \Delta f_{high}(R). \quad (10)$$

Пятым шагом является получение ФЧХ УС с каплями на поверхности путем сдвига ФЧХ УС без капель на суммарные сдвиги резонансных частот УС в состояниях ON и OFF. После этого по полученным ФЧХ определяется изменение разности сдвигов фаз в рабочей частотной

Таблица 1. Размеры УС

Обозначение	Значение для 4,8 ГГц
$a$	31,23 мм
$b_w$	25,54 мм
$b_l$	18,66 мм
$h$	0,775 мм
$t$	0 мм

полосе УС при различных интенсивностях дождя. Наконец, определим потери мощности отраженного от RIS сигнала, вызванные изменением разности сдвигов фаз на рабочей частоте. Для этого воспользуемся выражением из статьи [18]:

$$\delta_{loss}(f) = 10 \cdot \log \left( \frac{1 - \cos(\varphi(f))}{2} \right), \quad (11)$$

где  $\varphi$  — разность сдвигов фаз УС в положениях ON и OFF на частоте  $f$ ,  $\delta_{loss}$  — потери мощности отраженного от RIS сигнала, связанные с изменением разности сдвигов фаз на частоте  $f$ . Пользуясь выражением (11), средние потери мощности  $\delta_{aver}$  могут быть выражены следующим образом:

$$\delta_{aver} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} \delta_{loss}(f) df}{f_{max} - f_{min}}, \quad (12)$$

где  $f_{min}$  — нижняя граница рабочей полосы,  $f_{max}$  — верхняя граница рабочей полосы.

В данной работе используется следующий критерий корректной работы RIS: средние потери в полосе не должны превышать 3 дБ, так как при его соблюдении алгоритм настройки, описанный в [5], не требует внесения изменений сдвигов фаз.

## 5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе рассматриваются УС с размерами, представленными в таблице. 1. В исследуемых УС в качестве материала металлических элементов используется медь («Copper (pure)» в CST), а в качестве материала диэлектрика «Taconic TLX-8 (lossy)» с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_p = 2,55$  и тангенсом угла наклона  $\delta_p = 0,0017$ . Также используется PIN-диод с  $C_{OFF} = 42$  фФ,  $L_{ON} = L_{OFF} = 50$  пГн,  $R_{ON} = 4,2$  Ом. Рассматриваются капли воды, которая имеет диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_w = 78$  и удельную проводимость  $G = 1,59$  См/м. Погрешности определения фазы и частоты составляют  $\pm 3^\circ$  и  $\pm 6$  МГц соответственно. Таким образом, интервал погрешности определения частоты равен 12 МГц.

На рис. 3 представлены ФЧХ УС с рабочей частотой 4,8 ГГц в состояниях ON и OFF с каплей и без. Наличие капли на поверхности УС приводит к сдвигу графиков ее ФЧХ и АЧХ в состояниях ON и OFF влево, причем для каждого состояния этот сдвиг разный. Сдвиг ФЧХ в свою очередь соответствует уменьшению резонансных частот УС в состояниях ON и OFF.

### 5.1. Обоснование аддитивности сдвигов резонансных частот УС в состояниях ON и OFF

Для обоснования аддитивности сдвигов резонансных частот проводится моделирование УС с двумя, тремя и шестью каплями на ней. Сдвиги, вызванные наличием двух, трёх или шести капель обозначим  $\Delta f_2$ , а сумму сдвигов, вызванных отдельно соответствующими каплями  $\Delta f_1$ . Таким образом, аддитивность сдвигов резонансных частот будет выполняться при  $\Delta f_1 = \Delta f_2$ . На рис. 4 представлены зависимости  $\Delta f_2$  от  $\Delta f_1$  для случаев с двумя, тремя или шестью капель в обоих состояниях. На графике также присутствует прямая  $\Delta f_2 = \Delta f_1$  и выделен диапазон  $\pm 4$  МГц от нее. По графикам видно, что максимальное отклонение от прямой  $\Delta f_1 = \Delta f_2$  не превышает 4 МГц, что меньше погрешности определения частоты. Таким образом, выполняется аддитивность сдвигов резонансных частот.

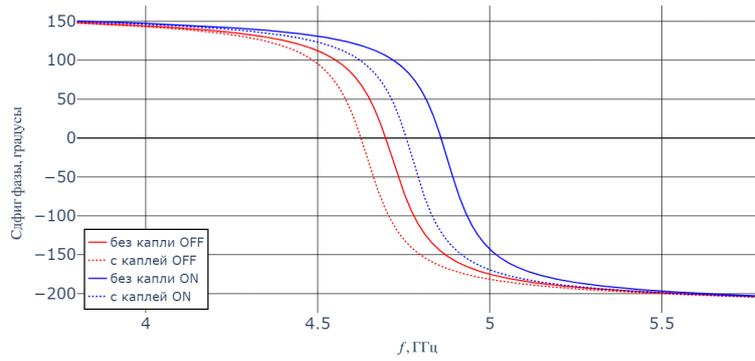


Рис. 3. ФЧХ УС в состояниях ON и OFF с каплей и без.

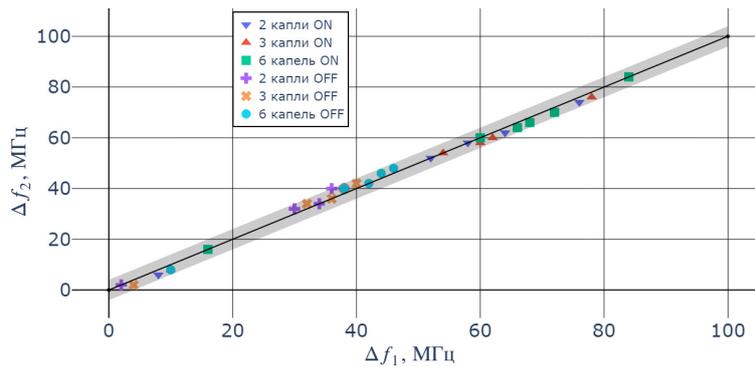


Рис. 4. Зависимость сдвига резонансной частоты, вызванного несколькими каплями, от суммы сдвигов, вызванных отдельно соответствующими каплями.

5.2. Влияние одной капли

Сдвиг резонансной частоты, вызванный наличием капли диаметром 1,5 мм на поверхности УС, больше 12 МГц, что не наблюдается при меньших диаметрах капли, что, в свою очередь, приводит к тому, что пороговое значение диаметра капли воды  $D_{lim}$  составляет 1,5 мм. На рис. 5 представлены зависимости сдвига резонансной частоты УС от координат центра капли диаметром  $D = 1,5$  мм. Из результатов видно, что наибольшее влияние на резонансную частоту УС капля оказывает при расположении ее на границе патча, то есть при  $l_{center} \approx \pm 10$  мм или  $w_{center} \approx 10$  мм, поскольку в данных местах наибольшая концентрация силовых линий электрического поля [16]. При этом, в силу поляризации вдоль оси  $l$  падающей ЭМ волны, влияние капли воды при ее расположении на границе УС, перпендикулярной поляризации ( $l_{center} \approx \pm 10$  мм) больше, чем при ее расположении на границе УС, параллельной поляризации ( $w_{center} \approx \pm 10$  мм). Более того, капля воды оказывает большее влияние на резонансную частоту УС при ее расположении на той границе УС, где располагается PIN-диод ( $l_{center} \approx 10$  мм). Данные факты также обосновываются различной концентрацией силовых линий электрического поля.

5.3. Влияние капель с  $D > D_{lim}$

На рис. 6 показаны зависимости средних сдвигов резонансной частоты  $\Delta f(D)$ , вызванных наличием капли на поверхности УС, от диаметра капли  $D$  для обоих состояний. В скобках указаны уравнения аппроксимирующих кривых, используемых для расчета зависимостей сдвигов резонансных частот, вызванных наличием капель диаметром больше  $D_{lim}$  на поверхности УС,

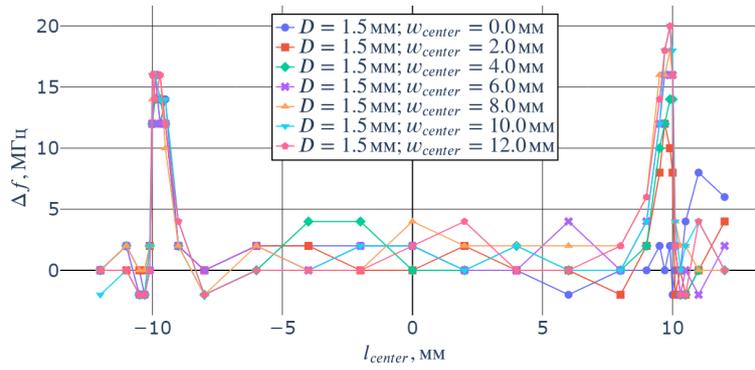


Рис. 5. Сдвиг резонансной частоты УС, вызванный наличием капли диаметром 1,5 мм на поверхности УС.

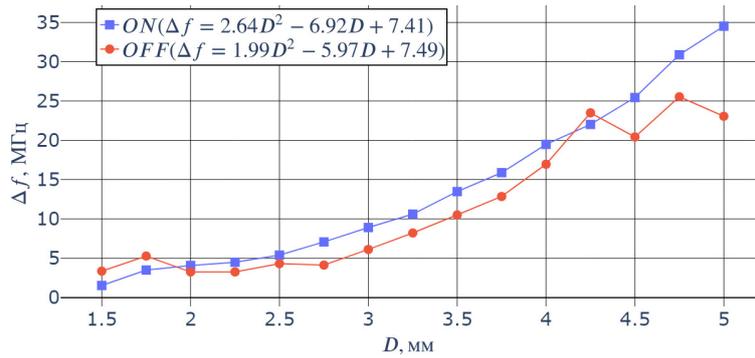


Рис. 6. Зависимости сдвига резонансной частоты, вызванного наличием капли на поверхности УС, от ее диаметра.

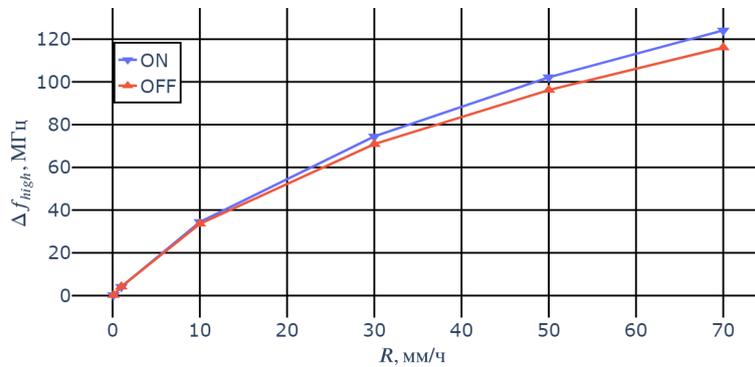


Рис. 7. Зависимости сдвига резонансной частоты УС, вызванного наличием капель диаметром больше  $D_{lim}$  на поверхности УС, от интенсивности дождя  $R$ .

от  $R$ . Данные зависимости (9) показаны на рис. 7 и будут использованы далее для расчета общих сдвигов резонансных частот.

#### 5.4. Влияние капель с $D < D_{lim}$

На рис. 8(а) представлены зависимости сдвига резонансной частоты в состоянии ON, вызванного наличием капель с  $D < D_{lim}$  на поверхности УС, от интенсивности дождя  $R$  для различных  $\Delta D_{low}$ . Кривые (МАКС) и (МИН) соответствуют случаям, в которых все капли

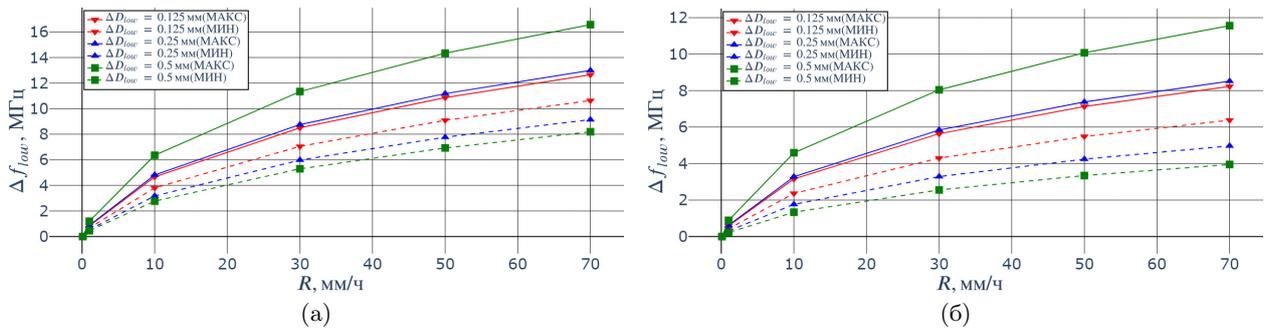


Рис. 8. Зависимости сдвига резонансной частоты УС в состояниях ON (а) и OFF (б), вызванного наличием капель с  $D < D_{\text{lim}}$  на поверхности УС, от интенсивности дождя  $R$ .

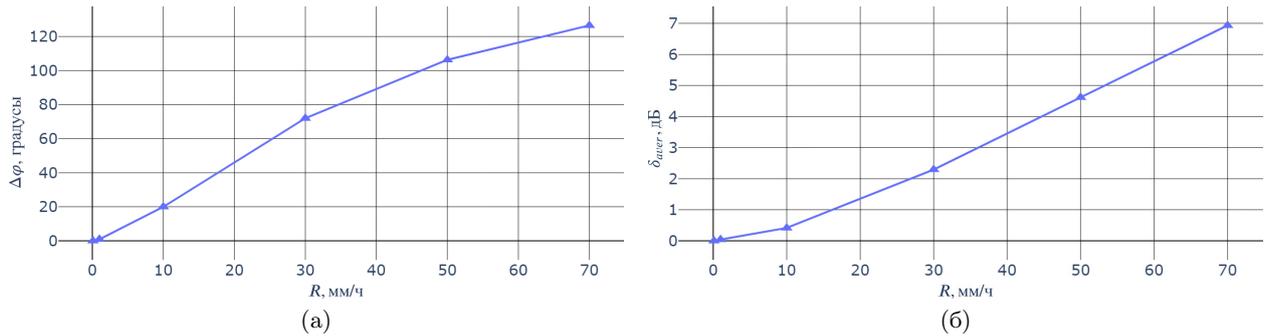


Рис. 9. Зависимости уменьшения разности сдвига фаз (а) и мощности отраженного от RIS сигнала (б), вызванных наличием капель дождя на поверхности УС, от интенсивности дождя  $R$ .

заменяются на капли максимального и минимального диаметра на каждом промежутке, соответственно. Аналогичные зависимости для состояния OFF представлены на рис. 8(б).

Из графиков следует, что при уменьшении  $\Delta D_{\text{low}}$  кривые (МАКС) и (МИН) приближаются друг к другу. При этом, чем больше диаметр капли, тем больше сдвиг резонансной частоты она вызывает, поэтому значения кривых (МАКС) больше, а значения кривых (МИН) меньше истинных значений сдвига резонансной частоты соответственно. Таким образом, истинное значение сдвига резонансной частоты находится между кривыми (МАКС) и (МИН), при этом при  $\Delta D_{\text{low}} = 0,125$  мм разница значений кривых (МАКС) и (МИН) не превышает 2 МГц, что не превышает погрешность измерения сдвига резонансной частоты. Поэтому в качестве значений сдвигов резонансной частоты, вызванных наличием капель с  $D < D_{\text{lim}}$  на поверхности УС, берутся средние арифметические значений кривых (МАКС) и (МИН) для каждого состояния с  $\Delta D_{\text{low}} = 0,125$  мм.

### 5.5. Суммарное влияние капель

На рис. 9(а) показана зависимость уменьшения разности фаз  $\Delta \varphi$  на рабочей частоте, вызванного наличием капель воды на поверхности УС, от интенсивности дождя  $R$ . Потери, вызванные сдвигом АЧХ, не превышают 1,7 % ( $< 0,2$  дБ) от потерь, вызванных сдвигом ФЧХ, для каждой интенсивности, поэтому они не учитываются. На рис. 9(б) показана зависимость средних потерь по частотной полосе  $\delta_{\text{aver}}$ , вызванных наличием капель на поверхности УС, от интенсивности дождя. На графике видно, что граничное значение  $R$ , при котором выполняется критерий корректной работы RIS, примерно равно 35 мм/ч. При больших значениях  $R$  разность сдвигов фаз, вносимую в алгоритм настройки RIS, необходимо скорректировать, используя значение из рис. 9(а).

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе при помощи моделирования исследовано влияние капель воды на поверхности RIS на ее характеристики. Для этого получены зависимости значений ФЧХ и АЧХ УС на рабочей частоте 4,8 ГГц от интенсивности дождя, используя которые получены зависимости потерь мощности отраженного от RIS сигнала, вызванных наличием капель дождя на поверхности УС, от интенсивности дождя. Определены значения интенсивности дождя, удовлетворяющие критерию корректной работы RIS, в котором средние потери в полосе, внесенные наличием капель дождя на поверхности УС, должны быть меньше 3 дБ. Для остальных значений интенсивности дождя найдены разности сдвига фаз, которые позволяют скорректировать алгоритм настройки RIS. Также с помощью моделирования проверена аддитивность сдвига резонансной частоты УС в состояниях ON и OFF.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fernandez M. Codes for exact support recovery of sparse vectors from inaccurate linear measurements and their decoding. *Problems of Information Transmission*, 2023, vol. 59, no. 1, pp. 14–21.
2. Trifonov P. V. Design and decoding of polar codes with large kernels: a survey. *Problems of Information Transmission*, 2023, vol. 59, no. 1, pp. 22–40.
3. Tyarin A. S., Kureev A. A., Khorov E. M. Fundamentals of design and operation of reconfigurable intelligent surfaces. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2024, pp. 1–7.
4. Liu Y. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577.
5. Poyda A. I., Burtakov I. A. Fast Wide Beam Adjustment of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Practical Deployments. *IEEE Access*, 2024, p. 1.
6. Albanese A. MARISA: A self- configuring metasurfaces absorption and reflection solution towards 6G. *IEEE INFOCOM 2022-IEEE Conference on Computer Communications*. London: IEEE, 2022, pp. 250–259.
7. Wu Q., Zhang R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design. *2018 IEEE global communications conference*. Abu Dhabi: IEEE, 2018, pp. 1–6.
8. Cai W. Practical modeling and beamforming for intelligent reflecting surface aided wideband systems. *IEEE Communications Letters*, 2020, vol. 24, no. 7, pp. 1568–1571.
9. Zhang Y. P. Rainfall effect on the performance of millimeter-wave MIMO systems. *IEEE Transactions on wireless communications*, 2015, vol. 14, no. 9, pp. 4857–4866.
10. Christofilakis V. Earth-to-earth microwave rain attenuation measurements: A survey on the recent literature. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 9, pp. 1440.
11. Han C. Impact of atmospheric parameters on the propagated signal power of millimeter-wave bands based on real measurement data. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 113626–113641.
12. Mancini A. The Impact of a Wet S-Band Radome on Dual-Polarized Phased-Array Radar System Performance. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 67, no. 1, pp. 207–220.
13. Liu Z. Anti-interfering method for environmental foreign bodies for the microstrip antenna sensor. *Measurement*, 2022, vol. 195, pp. 111132.
14. Yang H. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control. *Scientific reports*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 35692.
15. Delos P. Phased array antenna patterns-part 1: Linear array beam characteristics and array factor. *Analog Dialogue*, 2020, vol. 54, no. 2, pp. 1–8.

16. Balanis C. Modern antenna handbook. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
17. Dvorkin G. D. Geometric interpretation of the entropy of sofic systems. Problems of Information Transmission, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 115–127.
18. Yang J. How practical phase-shift errors affect beamforming of reconfigurable intelligent surface? IEEE Transactions on Communications, 2023, vol. 71, no. 10, pp. 6130–6145

## The Effect of Water Droplets on the Characteristics of a Reconfigurable Intelligent Surface

S.S. Tronin, A.S. Tyarin, A.A. Kureev, E.M. Khorov

Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs) are devices of periodic structure to increase the bandwidth and coverage area of wireless networks. When deployed in wireless communication systems, these devices are affected by weather conditions, such as rain, which may lead to incorrect operation. This paper investigates the dependences of the amplitude and phase frequency response of RIS, as well as the power loss of the signal reflected from RIS on the intensity of rain for RIS cells with an operating frequency of 4.8 GHz. For this purpose, an algorithm has been developed to calculate the effect of water droplets on the RIS surface on its amplitude and phase frequency response. The results show that when the rain intensity is less than 35 mm/h, the power loss of the signal reflected from the RIS does not exceed 3 dB.

**KEYWORDS:** RIS, PIN diode, water droplets, CST Microwave Studio.