

# АНТЕННЫ, ВОЛНОВОДНАЯ И КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.03.222>

УДК 621.396, 677.71

В. А. КАТРИЧ, В. А. ЛЯЩЕНКО, Н. В. МЕДВЕДЕВ

PACS number: 84.40.Ba

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: n.v.medvedev@karazin.ua

## МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ КОЛЬЦЕВЫХ ЩЕЛЕЙ В ЭКРАНЕ КООКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ

*Предмет и цель работы: Исследуются электродинамические характеристики решеток кольцевых щелей в экране коаксиальной линии и способы управления ими путем изменения геометрических параметров фидера, решетки и электрофизических параметров внутреннего и внешнего пространства.*

*Методы и методология: Задача возбуждения и излучения электромагнитных волн системой кольцевых щелей в бесконечно тонком и идеально проводящем экране коаксиальной линии решается методом магнитодвижущих сил с последующим созданием многопараметрической численной модели многоэлементной антенной решетки.*

*Результаты: Исследованы энергетические характеристики, амплитудно-фазовые распределения и диаграммы направленности систем кольцевых щелей, расположенных в экране бесконечных и полубесконечных коаксиальных линий с учетом и без учета внешних взаимных связей между излучателями для различных параметров антенны.*

*Заключение: Проведенные исследования электродинамических характеристик решеток кольцевых щелей в экране коаксиальной линии показали слабое влияние внешних взаимных связей между излучателями на направленные свойства антенны и существенное влияние на ее энергетические характеристики. Показано отличие характеристик системы кольцевых щелей от системы дуговых щелей.*

*Ключевые слова: коаксиальная линия, кольцевая щель, диаграмма направленности, амплитудно-фазовое распределение, коэффициент излучения, коэффициент отражения, взаимные связи*

### 1. Введение

Коаксиально-щелевые антенны или так называемые излучающие кабели применяются в мобильной, сотовой, пейджинговой связи, в радарных установках, в низкоорбитальных мобильных комплексах, например, LEO MSAT (low-Earth-orbit mobile satellite). Такие антенны используются в качестве антенн связи в местах с высокой степенью экранировки: метрополитенах, тоннелях, шахтах, подземных коммерческих и торговых центрах. Коаксиально-щелевые антенны работают также в средствах специальной связи и связи с движущимися объектами, средствах настройки и калибровки спутниковых систем, охранных системах и системах обнаружения. Особое значение имеет применение коаксиально-щелевых антенн в качестве зондов и облучателей в медицине и биологии в диагностическом и терапевтическом оборудовании [1–6].

Существуют два типа излучающих кабелей. В первом случае в экране кабеля имеются отверстия (щели), размеры и расстояния между которыми много меньше длины волны  $\lambda$ . Такие антенны называются кабелями со связанными волнами или кабелями вытекающей волны. Второй тип характеризуется тем, что щели располагаются на расстояниях, соизмеримых с длиной волны, т. е. фактически рассматриваемые излучающие кабели представляют собой антенные решетки. Именно этот тип излучающих кабелей является предметом настоящих исследований.

В экране коаксиальной линии могут прорезаться поперечные узкие кольцевые либо дуговые щели. В работе авторов [7] были рассмотрены характеристики систем дуговых щелей во внешнем проводнике коаксиальной линии. Целью настоящей работы является исследование энергетических коэффициентов

и направленных свойств многоэлементной антенной решетки в виде системы поперечных кольцевых щелей, расположенных в экране коаксиальной линии, изучение влияния размеров коаксиальных линий на электродинамические характеристики антенн.

## 2. Постановка и решение задачи

Методом магнитодвижущих сил (МДС) исследуются электродинамические характеристики систем из  $N$  узких ( $d < \lambda$ ) поперечных кольцевых щелей ширины  $d$ . Излучатели прорезаются на расстояниях  $D_z$  друг относительно друга в бесконечно тонких и идеально проводящих экранах бесконечных и полубесконечных коаксиальных линий с различными значениями радиусов внутренних и внешних проводников  $a_1$  и  $a_2$  соответственно (рис. 1). Область внутри фидера ( $v^i$ ) заполнена диэлектриком без потерь с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon^i$ . Пространство вне фидера ( $v^e$ ) в общем случае заполнено неидеальным диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon^e$ .

Рассмотрим возбуждение и рассеяние электромагнитных волн системой поперечных кольцевых щелей, расположенных в экране коаксиальной линии. Источники поля находятся внутри фидера. Щели, возбуждаемые этими источниками, излучают электромагнитные волны во внешнее пространство и изменяют поле в коаксиальной линии. Для нахождения касательной составляющей электрического вектора  $\vec{E}$  в щелях (или амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве антенны) воспользуемся условием непрерывности магнитных составляющих поля на поверхности щелей:

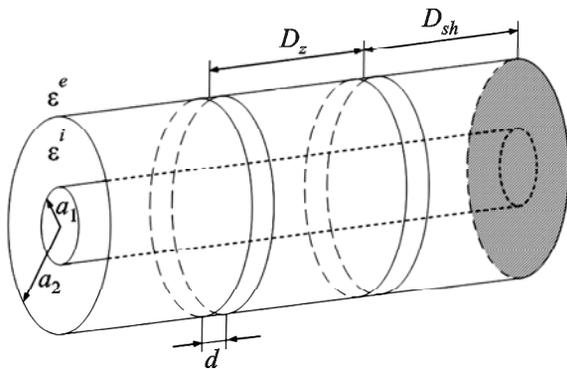


Рис. 1. Геометрия системы

$$\vec{H}_\tau^e \{ \vec{E} \} - \vec{H}_\tau^i \{ \vec{E} \} = \vec{H}_\tau^0, \quad (1)$$

где  $\vec{H}_\tau^e \{ \vec{E} \}$ ,  $\vec{H}_\tau^i \{ \vec{E} \}$  – поля, возбуждаемые щелями в областях  $v^e$  и  $v^i$  соответственно,  $\vec{E}$  – искомая касательная составляющая электрического поля в раскрыве многощелевой антенны;  $\vec{H}_\tau^0$  – поле источников.

Для решения уравнения (1) применим метод Галеркина, т. е. поле на поверхности системы щелей представим в виде ряда:

$$\vec{E} = \sum_{s=1}^N \sum_{p=1}^M V_{ps} \vec{E}_{ps}, \quad (2)$$

где  $V_{ps}$  – неизвестные комплексные амплитуды,  $s$  – номер щели,  $p$  – номер собственной функции отверстия;  $\vec{E}_{ps}$  – заданные на поверхностях щелей линейно-независимые вектор-функции, удовлетворяющие на контуре щели краевым условиям (собственные функции отверстия).

После некоторых преобразований получим систему алгебраических уравнений относительно  $V_{ps}$ :

$$\sum_{p=1}^M \sum_{s=1}^N V_{ps} Y_{pq,rs} = F_{qr}, \quad (3)$$

$$q = 1, 2, 3, \dots, M, \quad r = 1, 2, 3, \dots, N,$$

где  $M$  – количество аппроксимирующих вектор-функций;  $N$  – количество щелей;  $Y_{pq,rs} = Y_{pq,rs}^e + Y_{pq,rs}^i$  – собственные при  $p = q$ ,  $r = s$ , взаимные по гармоникам при  $p \neq q$ ,  $r = s$  и взаимные по щелям при  $r \neq s$  частичные проводимости  $p$ -й и  $q$ -й гармоник функции распределения между  $r$ -й и  $s$ -й щелью:

$$Y_{pq,rs}^i = - \int_s \left[ \vec{E}_{qs} \vec{H}_\tau^i \{ \vec{E}_{pr} \} \right] d\vec{s}, \quad (4)$$

$$Y_{pq,rs}^e = \int_s \left[ \vec{E}_{qs} \vec{H}_\tau^e \{ \vec{E}_{pr} \} \right] d\vec{s},$$

$$F_{qr} = \int \left[ \vec{E}_{qr} \vec{H}_\tau^0 \right] d\vec{s} - \quad (5)$$

магнитодвижущая сила;  $d\vec{s} = \vec{n} ds$ ,  $\vec{n}$  – единичная нормаль к поверхности щели  $s$ , направленная внутрь области  $v^e$ .

Таким образом, для решения системы (3) и, следовательно, нахождения поля в раскрыве антенны (2) необходимо определить в явном виде внутренние  $Y_{pq,rs}^i$  и внешние  $Y_{pq,rs}^e$  частичные проводимости, а также магнитодвижущие силы  $F_{qr}$ .

В такой постановке задачи система поперечных щелей может возбуждаться любым типом волны (в том числе и высшим), который будет распространяться в коаксиальной линии. Основная волна в коаксиальной линии ( $T$ -волна) имеет симметричную структуру поля. Если система узких кольцевых щелей возбуждается основной волной, тогда распределение поля вдоль одиночной кольцевой щели будет постоянным [8]:

$$\vec{E}_s = \frac{\vec{z}^0}{d},$$

здесь  $\vec{z}^0$  – единичный орт, направленный поперек щели.

При таком выборе собственной функции коэффициент  $V_s$  в (2) и (3) приобретает смысл амплитуды напряжения на щели.

Выражения, описывающие внутренние и внешние, собственные и взаимные проводимости щелевых излучателей, а также магнитодвижущие силы в случае как бесконечной, так и полубесконечной коаксиальных линий, в явном виде представлены в работах [8–10].

Определив собственные и взаимные проводимости щелевых излучателей (4) и магнитодвижущие силы (5) и решив систему уравнений (3), найдем значения комплексных амплитуд поля на поверхностях щелей  $V_s$ , т. е. амплитудно-фазовое распределение в раскрыве антенны. Далее исследуем коэффициенты излучения  $|S_\Sigma|^2$ , отражения  $|S_{11}|$  и диаграмму направленности системы излучателей  $F_c(\theta)$  (диаграмма одиночной щели не учитывалась) в плоскости  $E$  (плоскость, содержащая ось антенны, причем угол  $\theta$  отсчитывается от нормали) согласно выражениям:

$$S_{11} = -\frac{1}{4} \sum_{s=1}^N V_s F_s,$$

$$|S_\Sigma|^2 = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N V_r V_s^* Y_{rs}^e,$$

$$F_c(\theta) = \sum_{s=1}^N V_s e^{jkz_s \sin \theta}.$$

Таким образом, представленная методика позволяет решить внутреннюю и внешнюю задачи коаксиально-щелевой антенной решетки.

### 3. Анализ полученных результатов

При разработке любой антенной системы на коэффициенты излучения и отражения, а также на диаграмму направленности накладываются определенные требования, а именно: коэффициент излучения должен быть достаточно высоким (больше чем 0.8), а коэффициент отражения – минимально возможным. При этом диаграмма направленности антенной решетки должна иметь определенную ширину главного лепестка по уровню 0.707 и малый уровень боковых лепестков. Выполнение этих требований позволяет создать антенны с приемлемыми коэффициентом направленного действия и коэффициентом усиления.

С целью детального изучения процессов возбуждения и рассеяния электромагнитных волн системой щелей в экране коаксиальной линии были исследованы электродинамические характеристики антенн в виде решеток узких поперечных кольцевых щелей, прорезанных в экранах коаксиальных линий разных поперечных размеров. Относительные диэлектрические проницаемости  $\epsilon^i$  и  $\epsilon^e$  изменялись. Варьировались расстояния между излучателями  $D_z$ .

Изменение этих параметров антенной решетки позволяет создавать различные виды амплитудно-фазовых распределений, т. е. управлять формой диаграммы направленности в плоскости вектора  $\vec{E}$ . Отметим, что кольцевая щель не обладает направленностью в плоскости вектора  $\vec{H}$ .

Коаксиальные линии с различными значениями радиусов  $a_1$  и  $a_2$  имеют различные погонные затухания  $\alpha$  согласно выражению

$$\alpha = 0.1724 \frac{1 + \frac{a_2}{a_1}}{a_2 \sqrt{\sigma \lambda} \lg \left( \frac{a_2}{a_1} \right)},$$

где  $\sigma$  – проводимость металла проводников коаксиальной линии [11]. Видно, что с увеличением внешнего радиуса коаксиальной линии погонное затухание уменьшается и, следовательно, коэффициент усиления коаксиально-щелевой антенны будет увеличиваться.

Все исследования энергетических коэффициентов и направленных свойств проводились в широком диапазоне длин волн. Параметры коаксиально-щелевых решеток ( $\epsilon^i$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ) были взяты из литературных источников [4, 12].

Изучим характеристики многоэлементных коаксиально-щелевых решеток на примере систем кольцевых щелей в экранах двух коаксиальных линий с разными размерами:  $a_1 = 2.5$  мм,  $a_2 = 12$  мм (фидер 1) и  $a_1 = 8$  мм,  $a_2 = 20.65$  мм (фидер 2).

Относительные диэлектрические проницаемости диэлектриков, заполняющих внутренние и внешние объемы коаксиальных линий, были равны  $\epsilon^i = 1.23$ , 2 и  $\epsilon^e = 1$ . Количество щелей было равным  $N = 10, 20$ .

Исследовались электродинамические характеристики нерезонансных и резонансных коаксиальных щелевых антенных решеток. В первом случае коаксиальная линия была нагружена на согласованную нагрузку, т. е. изучались характеристики кольцевых щелей (с учетом всех видов взаимных связей по внутреннему и внешнему пространствам), расположенных в бесконечном фидере. Во втором, т. е. в резонансном режиме (постоянное фазовое распределение вдоль щеле-

вой системы) изучались процессы излучения и рассеяния из системы щелей в полубесконечной коаксиальной линии.

Подчеркнем, что предложенная в настоящей работе методика исследования характеристик антенн позволяет провести расчеты энергетических коэффициентов как с учетом всех видов взаимной связи между излучателями (внутренней и внешней), так и без них. К примеру, задача нахождения электродинамических характеристик антенных решеток без учета внешней взаимной связи существенно упрощается.

На рис. 2 приведены некоторые результаты расчета коэффициентов излучения  $|S_{\Sigma}|^2 = f(\lambda)$  (кривые 1 и 1'), коэффициентов отражения  $|S_{11}| = f(\lambda)$  (кривые 2 и 2'), амплитудно-фазовых распределений  $V_s = |V_s|e^{i\psi_s}$  и диаграмм направленностей  $|F_c(\theta)|$  системы кольцевых щелей с  $N = 20$ ,  $d = 3$  мм,  $D_z = 40$  мм, прорезанных в экране фидера 1. Сплошные кривые 1–3 соответствуют зависимостям, рассчитанным с учетом всех взаимных связей между излучателями, пунктирные кривые 1'–3' – без учета внешнего взаимодействия. Диаграммы направленности и амплитудно-фазовые распределения были расчи-

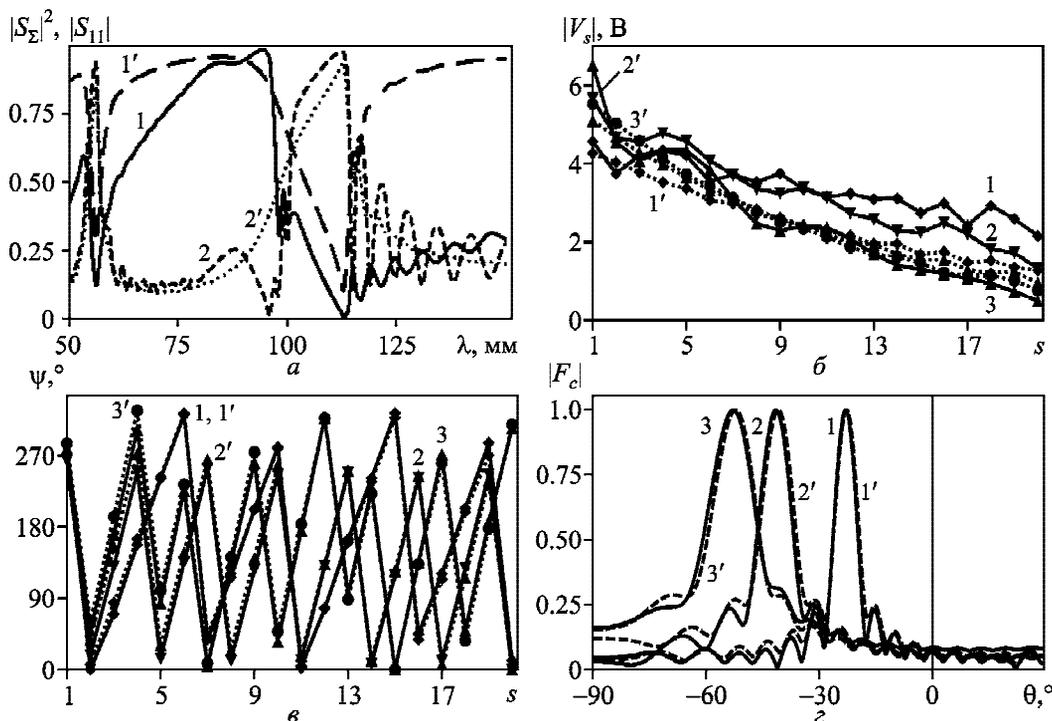


Рис. 2. Энергетические характеристики (а), амплитудные (б) и фазовые (в) распределения и диаграммы направленности (г) для решетки кольцевых щелей

таны при  $\lambda = 70, 80, 85$  мм (кривые 1(1')–3(3')) соответственно на рис. 2, б, в, з).

Из сравнения зависимостей, приведенных на рис. 2, видно, что внешняя взаимная связь слабо влияет на направленные свойства системы, но коэффициенты излучения и отражения существенно отличаются в случаях с учетом и без учета внешней взаимной связи между излучателями, особенно в коротковолновой части представленного диапазона. Амплитудные распределения в раскрыте антенны оказываются спадающими, но скорость убывания амплитуды поля вдоль системы значительно меньше, чем в случае дуговых щелей [7], что сказывается на форме диаграммы направленности. Это связано с тем, что кольцевые щели в отличие от дуговых являются нерезонансными излучателями [8, 10].

Одиночная кольцевая щель имеет невысокий коэффициент излучения, однако его значение сохраняется в довольно широкой полосе длин волн. Управление рабочей полосой решетки кольцевых щелей целесообразно осуществлять выбором соответствующего расстояния между излучателями. На рис. 3 представлены результаты расчета энергетических характеристик, амплитудно-фазовых распределений и диаграмм направленности для решеток кольцевых щелей с  $N = 20$ ,  $d = 6$  мм,  $D_z = 80$  мм, расположенных в экране фидера 2. Параметром является относительная внутренняя диэлектрическая проницаемость, которая равнялась  $\epsilon^i = 2$  (рис. 3, а, в, д, ж) и  $\epsilon^i = 1.23$  (рис. 3, б, з, е, з). Рабочий диапазон длин волн антенны, характеристики которой представлены на рис. 3, существенно сдвигается в длинноволновую область по сравнению с рабочим диапазоном антенны, соответствующие характеристики которой приведены на рис. 2. При уменьшении  $\epsilon^i$  уменьшаются длины волн, при которых наблюдается “эффект нормали” (синфазное сложение волн, отраженных от щелей, внутри коаксиальной линии), что приводит к смещению рабочей полосы в сторону коротких волн (рис. 3 а, б). В первом случае ( $\epsilon^i = 2$ , рис. 3, в, д, ж) кривые 1–3 соответствуют длинам волн  $\lambda = 120, 130, 140$  мм, во втором случае ( $\epsilon^i = 1.23$ , рис. 3, з, е, з) –  $\lambda = 100, 110, 120$  мм. С уменьшением  $\epsilon^i$  существенно снижаются максимальные значения коэффициента излучения  $|S_\Sigma|^2 = 0.91 \div 0.73$  (кривые 1 на рис. 3, а, б). Коэффициент излучения

системы можно повысить путем увеличения количества излучателей. При этом амплитудные распределения в обоих случаях носят спадающий характер (рис. 3, в, з), что приводит к возрастанию боковых лепестков диаграммы направленности (рис. 3, ж, з) по сравнению со случаем постоянного амплитудного распределения.

На рис. 4 представлены энергетические характеристики (а), амплитудные (б), фазовые (в) распределения и диаграммы направленности (з) решеток кольцевых щелей с параметрами  $N = 10$ ,  $d = 3$  мм,  $D_z = 40$  мм в бесконечной и полубесконечной коаксиальных линиях (фидер 1) с  $\epsilon^i = 2$ ,  $\epsilon^e = 1$ . На рис. 4, а кривые 1 и 3 представляют собой зависимости  $|S_\Sigma|^2 = f(\lambda)$  для случаев расположения решетки излучателей в бесконечной и полубесконечной коаксиальных линиях соответственно, кривая 2 – зависимость  $|S_{11}| = f(\lambda)$ . Рабочая полоса длин волн решетки щелей в бесконечной коаксиальной линии по уровню  $|S_\Sigma|^2 > 0.8$  равна 13 % (кривая 1) при центральной длине волны  $\lambda = 90$  мм.

На рис. 4, б, в представлены амплитудно-фазовые распределения поля в решетке для трех длин волн:  $\lambda = 56.5$  мм – кривая 1,  $\lambda = 70$  мм – кривая 2 и  $\lambda = 85$  мм – кривая 3. Видно, что при длине волны  $\lambda = 56.5$  мм как амплитудное, так и фазовое распределение (кривые 1) близки к постоянным (с несущественными отклонениями). То есть в данном случае решетка работает в резонансном режиме, что обуславливает нормальное, по отношению к апертуре, положение главного луча диаграммы направленности (рис. 4, б, в, кривая 1) и наблюдаемое возрастание  $|S_{11}|$  – “эффект нормали” (рис. 4, а, кривая 2). При увеличении длины волны амплитудное распределение в решетке изменяется от практически постоянного до спадающего с некоторыми осцилляциями (кривые 1–3). Фазовое распределение в свою очередь приобретает наклон, а в дальнейшем существенно искажается, как видно из рис. 4, в (кривые 1–3). Эти эффекты искажения амплитудно-фазового распределения обусловлены усиливающимся с ростом длины волны влиянием взаимной связи между щелевыми излучателями в решетке ( $D_z/\lambda = 0.47 \div 0.7$ ).

На рис. 4, з представлены диаграммы направленности решетки для тех же длин волн. С изменением длины волны происходит качание глав-

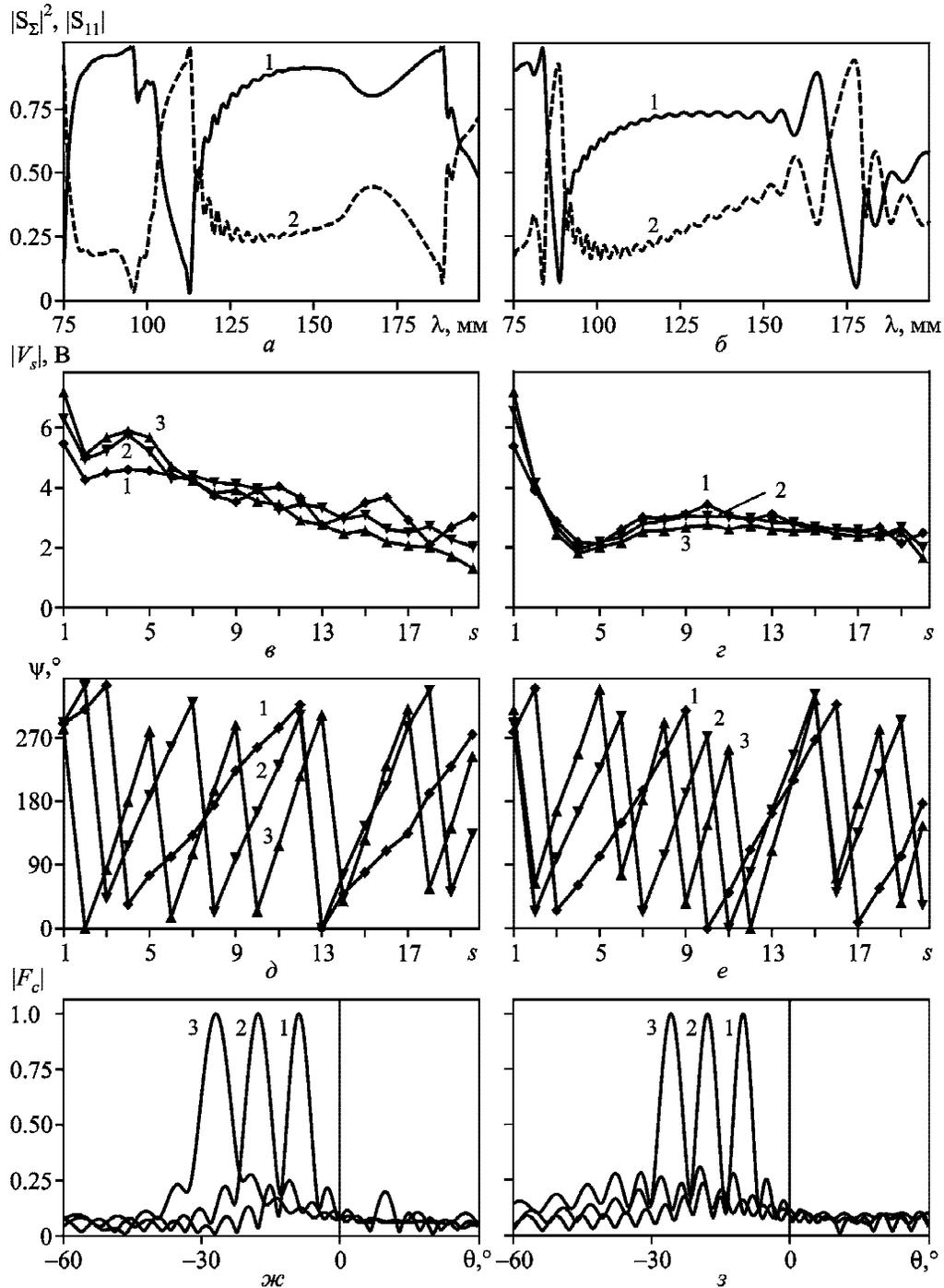


Рис. 3. Энергетические характеристики (а, б), амплитудные (в, г) и фазовые (д, е) распределения и диаграммы направленности (ж, з) для решеток кольцевых щелей. Кривые на панелях слева рассчитаны при значении  $\epsilon^i = 2$ , на панелях справа –  $\epsilon^i = 1.23$

ного луча диаграммы направленности, однако сильно спадающее амплитудное распределение в раскрыве решетки (рис. 4, б, кривые 2, 3) приводит к “заплыванию” нулей и увеличению уровня боковых лепестков диаграммы направленности. Имеется также отличие в определении направ-

ления главного максимума (до 13 %) и ширины главного луча диаграммы направленности (до 25 %) по сравнению с соответствующими характеристиками, рассчитанными по формулам, которые получаем при исследовании антенной решетки без учета взаимных связей:

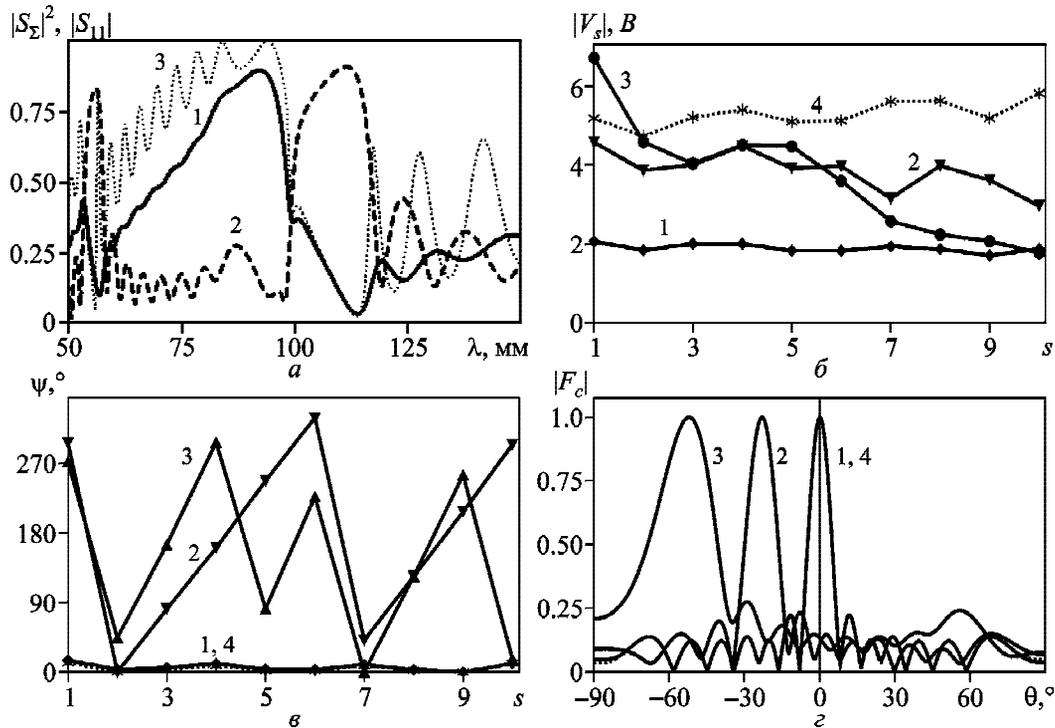


Рис. 4. Энергетические характеристики (а), амплитудные (б) и фазовые (в) распределения и диаграммы направленности (г) для решетки кольцевых щелей при  $\epsilon^i = 2$ ,  $\epsilon^e = 1$

$$\sin \theta = \frac{2n\pi \pm \gamma D_z}{kD_z},$$

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{ND_z \cos \theta_0},$$

где  $n$  – целое число,  $\gamma$  и  $k$  – постоянные распространения волн во внутренней и внешней областях фидера соответственно,  $\theta_0$  – направление главного лепестка диаграммы направленности.

Кривые 4 на рис. 4, б, в и г отражают соответствующие характеристики резонансной ( $\lambda = 56.5$  мм) решетки кольцевых щелей на базе полубесконечной коаксиальной линии с расстоянием от центра крайней щели до торцевой стенки  $D_{sh} = 28$  мм. Зависимость  $|S_\Sigma|^2 = f(\lambda)$  для этого случая представлена на рис. 4, а (кривая 3). Коэффициент излучения  $|S_\Sigma|^2$  существенно возрастает как в рабочей области длин волн, так и при резонансе –  $\lambda = 56.5$  мм (кривая 3). Таким образом, правильным выбором расстояния  $D_{sh}$  удастся увеличить коэффициенты возбуждения щелевых элементов, не меняя форму амплитудно-фазового распределения (рис. 4, б, в, кривые 4), что обуславливает сохранение формы диаграммы направленности щелевой решет-

ки (рис. 4, г, кривая 4). Удастся также ослабить “эффект нормали”,  $|S_\Sigma|^2 \approx 0.82$ ,  $|S_{11}| \approx 0.18$ , (рис. 4, а, кривая 3).

#### 4. Выводы

Методом МДС решена задача возбуждения и рассеяния электромагнитных волн системой узких поперечных кольцевых щелей в экране коаксиальной линии с учетом всех видов взаимодействий между излучателями по внутреннему и внешнему пространствам. Исследованы коэффициенты излучения и отражения, амплитудно-фазовые распределения и направленные свойства коаксиально-щелевой решетки.

Показано, что внешнее взаимодействие между кольцевыми щелями не оказывает существенного влияния на форму диаграммы направленности, но заметно уменьшает коэффициент излучения в коротковолновой части используемого диапазона длин волн при заданных размерах антенной решетки.

Проведено сравнение электродинамических характеристик щелевых антенн, состоящих из дуговых и кольцевых щелей в коаксиальной линии. Кольцевая щель является нерезонансным излучателем, поэтому при одинаковых условиях

возбуждения амплитуды поля в кольцевых щелях существенно меньше, чем в дугowych. Как следствие, при одинаковых электрических длинах антенных решеток у систем кольцевых щелей коэффициент излучения меньше, а коэффициент отражения больше, чем у аналогичной антенны в виде решетки дугowych щелей. С увеличением радиусов проводников коаксиальной линии и увеличением расстояния между излучателями, т. е. при переходе в длинноволновую область, увеличивается коэффициент отражения. Скорость убывания амплитудного распределения вдоль системы кольцевых щелей меньше, чем вдоль системы дугowych. Следует подчеркнуть, что у решетки кольцевых щелей не наблюдается “развал” диаграммы направленности в отличие от решетки дугowych щелей [9].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Han Y. F., Yung K. N., Xie Z. M., and Chen R. S. Analysis and design of a coaxial slot antenna for mobile telecommunications // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symp.: Proc. Symp.* – Orlando, FL, USA: IEEE. – 1999. – Vol. 4. – P. 2424–2426. DOI: 10.1109/APS.1999.789299
2. Han Y. F., Yung K. N., Xie Z. M., and Chen R. S. Coaxial Multi-Slot Antenna Used for LEO-MSAT // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symp.: Proc. Symp.* – Orlando, FL, USA: IEEE. – 1999. – Vol. 4. – P. 2420–2423. DOI: 10.1109/APS.1999.789298
3. Inomata K., Yamaguchi Y., Yamada H., Tsujita W., Shikai M., and Sumi K. Accuracy of 2-Dimensional Object Location Estimation Using Leaky Coaxial Cables // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2011. – Vol. 59, Is. 6. – P. 2396–2403. DOI: 10.1109/TAP.2011.2143661
4. Kim D. H. and Eom H. J. Radiation of Leaky Coaxial Cable with Narrow Transverse Slots // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2007. – Vol. 55, Is. 1. – P. 107–110. DOI: 10.1109/TAP.2006.888414
5. Слізаренко А. О. Впровадження дводіапазонних мереж технологічного радіозв'язку в тунелях залізниць // *Інформаційно-керувачі системи на залізничному транспорті.* – 2014. – № 4. – С. 42–47.
6. Rubio M., Hernandez A., Salas L., Navarro E., and Avila-Navarro E. Coaxial Slot Antenna Design for Microwave Hyperthermia Using Finite-Difference Time Domain and Element Method // *Open Nanomedicine J.* – 2011. – Vol. 3. – P. 2–9. DOI: 10.2174/1875933501103010002
7. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Многоэлементные системы дугowych щелей в экране коаксиальной линии // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2016. – Т. 21, № 4. – С. 298–310. DOI: 10.15407/rpra21.04.298
8. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Коаксиально-щелевой излучатель // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – Вып. 163. – С. 183–190.
9. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Излучение из системы щелей в экране коаксиальной линии // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 146–156.
10. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Щелевой излучатель в коаксиальной линии // *Радиофизика та електроніка.* – 2010. – Т. 15, № 1. – С. 7–16.
11. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. – М.: Советское радио. – 1967. – 651 с.
12. Wang J. H. and Mei K. K. Theory and Analysis of Leaky Coaxial Cables With Periodic Slots // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2001. – Vol. 49, Is. 12. – P. 1723–1732. DOI: 10.1109/8.982452

#### REFERENCES

1. HAN, Y. F., YUNG, K. N., XIE, Z. M. and CHEN, R. S., 1999. Analysis and Design of a Coaxial Slot Antenna for Mobile Telecommunications. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Proceedings.* Orlando, FL, USA: IEEE, vol. 4, pp. 2424–2426. DOI: 10.1109/APS.1999.789299
2. HAN, Y. F., YUNG, K. N., XIE, Z. M. and CHEN, R. S., 1999. Coaxial Multi-Slot Antenna Used for LEO-MSAT. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Proceedings.* Orlando, FL, USA: IEEE, vol. 4, pp. 2420–2423. DOI: 10.1109/APS.1999.789298
3. INOMATA, K., YAMAGUCHI, Y., YAMADA, H., TSUJITA, W., SHIKAI, M. and SUMI, K., 2011. Accuracy of 2-Dimensional Object Location Estimation Using Leaky Coaxial Cables. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 59, is. 6, pp. 2396–2403. DOI: 10.1109/TAP.2011.2143661
4. KIM, D. H. and EOM, H. J., 2007. Radiation of Leaky Coaxial Cable with Narrow Transverse Slots. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 55, is. 1, pp. 107–110. DOI: 10.1109/TAP.2006.888414
5. YELIZARENKO, A., 2014. Introduction of Dual-Band Networks of Technological Radio Communication in Railway Tunnels. *Інформаційно-керувачі системи на залізничному транспорті.* no 4, pp. 42–47 (in Ukrainian).
6. RUBIO, M., HERNANDEZ, A., SALAS, L., NAVARRO, E. and AVILA-NAVARRO, E., 2011. Coaxial Slot Antenna Design for Microwave Hyperthermia Using Finite-Difference Time Domain and Element Method. *Open Nanomedicine J.* vol. 3, pp. 2–9. DOI: 10.2174/1875933501103010002
7. KATRICH, V. A., LYASHCHENKO, V. A. and MEDVEDEV, N. V., 2016. Multielement Systems of Arc Slots in a Coaxial Line Screen. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 21, is. 4, pp. 298–310 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra21.04.298
8. KATRICH, V. A., LYASHCHENKO, V. A. and MEDVEDEV, N. V., 2010. Coaxial-Slot Radiator. In: *Radiotekhnika: All-Ukr. Sci. Indep. Mag.* Kharkiv, Ukraine: KhNURE Publ. vol. 163, pp. 183–190 (in Russian).
9. KATRICH, V. A., LYASHCHENKO, V. A. and MEDVEDEV, N. V., 2012. Radiation from a Slot Array in a Coaxial Line Screen. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 3, is. 4, pp. 325–335. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i4.60

10. KATRICH, V. A., LYASHCHENKO, V. A. and MEDVEDEV, N. V., 2011. A Slot Radiator in a Coaxial Line. *Telecom. Radio Eng.* vol. 70, is. 5, pp. 395–411. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i5.20
11. FELDSTEIN, A. L., YAVICH, L. R. and SMIRNOV, V. P., 1967. *Handbook on waveguide technology elements*. Moscow, Russia: Sovetskoe Radio Publ. (in Russian).
12. WANG, J. H. and MEI, K. K. 2001. Theory and Analysis of Leaky Coaxial Cables With Periodic Slots. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 49, is. 12, pp. 1723–1732. DOI: 10.1109/8.982452

V. A. Katrich, V. A. Lyashchenko, and N. V. Medvedev

V. N. Kazarin Kharkiv National University,  
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

#### MULTIELEMENT SYSTEMS OF CIRCUMFERENTIAL SLOTS ON A COAXIAL LINE SCREEN

*Purpose:* The electrodynamic characteristics of circumferential slot arrays on a coaxial line shield and the ways of their control by changing the feeder, array geometrical parameters and electrophysical parameters of internal and external spaces are being studied.

*Design/methodology/approach:* The problem of electromagnetic wave excitation and radiation by the circumferential slot systems in the infinitely thin and perfectly conducting shield of a coaxial line is solving by the magnetomotive forces method with the following creation of a multiparameter numerical model of a multielement antenna array.

*Findings:* The energy characteristics, amplitude and phase distributions and radiation patterns of the circumferential slot systems cut in the shield of infinite and semi-infinite coaxial lines are examined with and without accounting for the external interconnection between radiators for different antenna parameters.

*Conclusions:* The investigations of electrodynamic characteristics of circumferential slot systems in a coaxial line shield have shown a low influence of the external interconnection between radiators on the directional characteristics and a significant influence on the antenna energy characteristics. Also, the main differences between the properties of circumferential and arc slot systems have been noticed.

*Key words:* coaxial line, circumferential slot, directivity pattern, amplitude and phase distribution, radiation coefficient, reflection coefficient, interconnection

V. O. Katrich, V. O. Lyashchenko, M. B. Medvedev

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

#### БАГАТОЕЛЕМЕНТНІ СИСТЕМИ КІЛЬЦЕВИХ ЩІЛИН В ЕКРАНІ КООКСІАЛЬНОЇ ЛІНІЇ

*Предмет і мета роботи:* Досліджуються електродинамічні характеристики решіток кільцевих щілин у екрані коаксіальної лінії та способи керування ними шляхом зміни геометричних параметрів фідеру, решітки та електрофізичних параметрів внутрішнього й зовнішнього просторів.

*Методи та методологія:* Задача збудження і випромінювання електромагнітних хвиль системою кільцевих щілин у нескінченно тонкому й ідеально провідному екрані коаксіальної лінії розв'язується методом магніторушійних сил з подальшим створенням багатопараметричної числової моделі багатоелементної антенної решітки.

*Результати:* Досліджено енергетичні характеристики, амплітудно-фазові розподіли і діаграми спрямованості систем кільцевих щілин, розташованих в екрані нескінченних та напівнескінченних коаксіальних ліній з урахуванням та без урахування зовнішніх взаємних зв'язків між випромінювачами для різноманітних параметрів антени.

*Висновки:* Виконані дослідження електродинамічних характеристик решіток кільцевих щілин у екрані коаксіальної лінії показали слабкий вплив зовнішніх взаємних зв'язків між випромінювачами на властивості спрямованості антени та істотний вплив на її енергетичні характеристики. Показано відмінності характеристик системи кільцевих щілин від системи дугових щілин.

*Ключові слова:* коаксіальна лінія, кільцева щілина, діаграма спрямованості, амплітудно-фазовий розподіл, коефіцієнт випромінювання, коефіцієнт відбиття, взаємні зв'язки

Статья поступила в редакцию 13.07.2017