

УДК 621.37.029.6

В.В. Бирюков, В.А. Грачев, Г.С. Малышев, А.С. Раевский, В.В. Щербаков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЕЧНЫХ ПЛАНАРНЫХ ЩЕЛЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования щелевых антенных решеток (ЩАР) конечных размеров. Приведены основные характеристики ЩАР, результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных. Даны рекомендации по созданию ЩАР с требуемыми характеристиками.

Ключевые слова: щелевая антенна, щелевая антенная решетка, диаграмма направленности, поляризация, коэффициент кросс-поляризации.

Введение

В последнее время большие усилия астрофизиков направлены на исследование свойств реликтового космического излучения, несущего в себе информацию о процессах, происходивших на самых ранних стадиях возникновения Вселенной. Наибольший интерес представляют степень изотропности и поляризации этого излучения в терагерцовом диапазоне частот [1].

Для приема столь малоинтенсивного излучения необходимы антенные решетки, состоящие из большого числа элементов, обладающих достаточно хорошей поляризационной селективностью. Примером таких антенн являются щелевые решетки. Важными их преимуществами является широкая полоса рабочих частот и малый коэффициент кросс-поляризации. Следует отметить, что в данном случае под антенной решеткой понимается просто массив одинаковых приемных элементов, отклики которых складываются.

Изготовление таких антенных систем и их экспериментальное исследование непосредственно в терагерцовом диапазоне частот является весьма сложной технологической и технической задачей, поэтому на первом этапе целесообразно отработать конструкцию такой антенной решетки в СВЧ диапазоне. Затем, пользуясь принципом электродинамического подобия, результаты можно перенести и в более высокочастотный диапазон.

Результаты исследований

В качестве элемента антенной решетки можно взять одну из комбинаций взаимно перпендикулярных щелей, показанных на рис. 1 цифрами 1-3. В этом случае каждый элемент антенной решетки позволяет определять поляризацию принимаемого излучения. Однако в ходе экспериментальных исследований было установлено, что наилучшим подавлением волны паразитной поляризации обладают антенны в виде одиночной щели. Более того, коэффициент кросс-поляризации данных антенн меньше зависит от точности изготовления, чем коэффициенты кросс-поляризации антенн 2 и 3, что особенно важно при последующем переходе в терагерцовый диапазон. Поэтому в дальнейших исследованиях в качестве приемного элемента щелевой антенной решетки использовалась одиночная щель 4 (рис. 1).

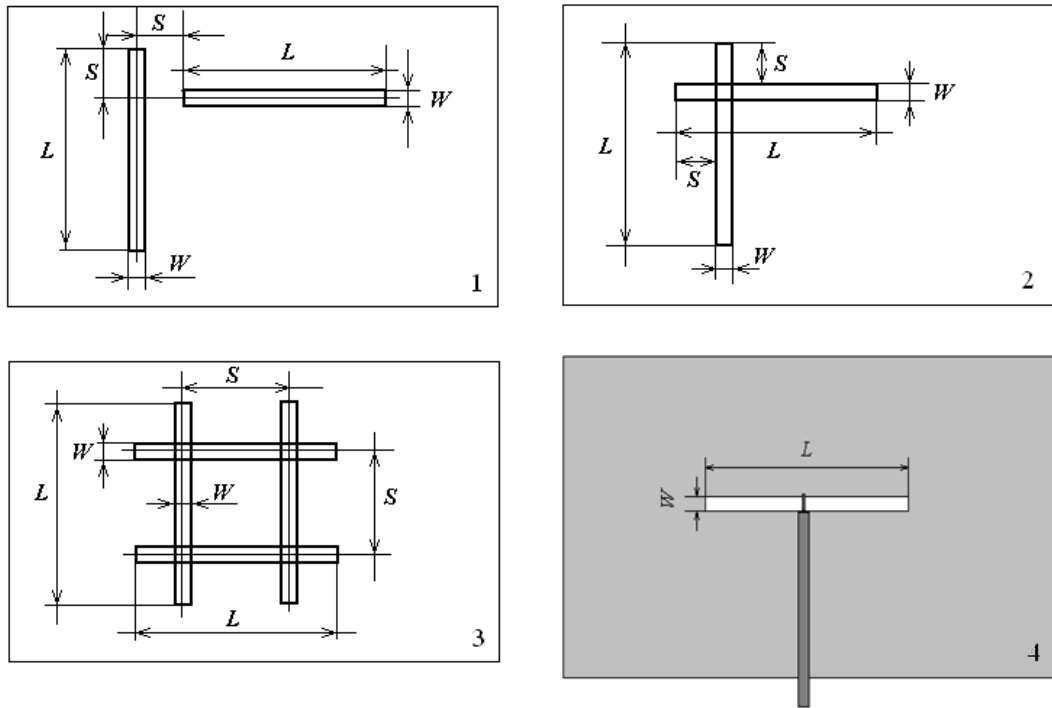


Рис. 1. Щелевые антенны различной конфигурации

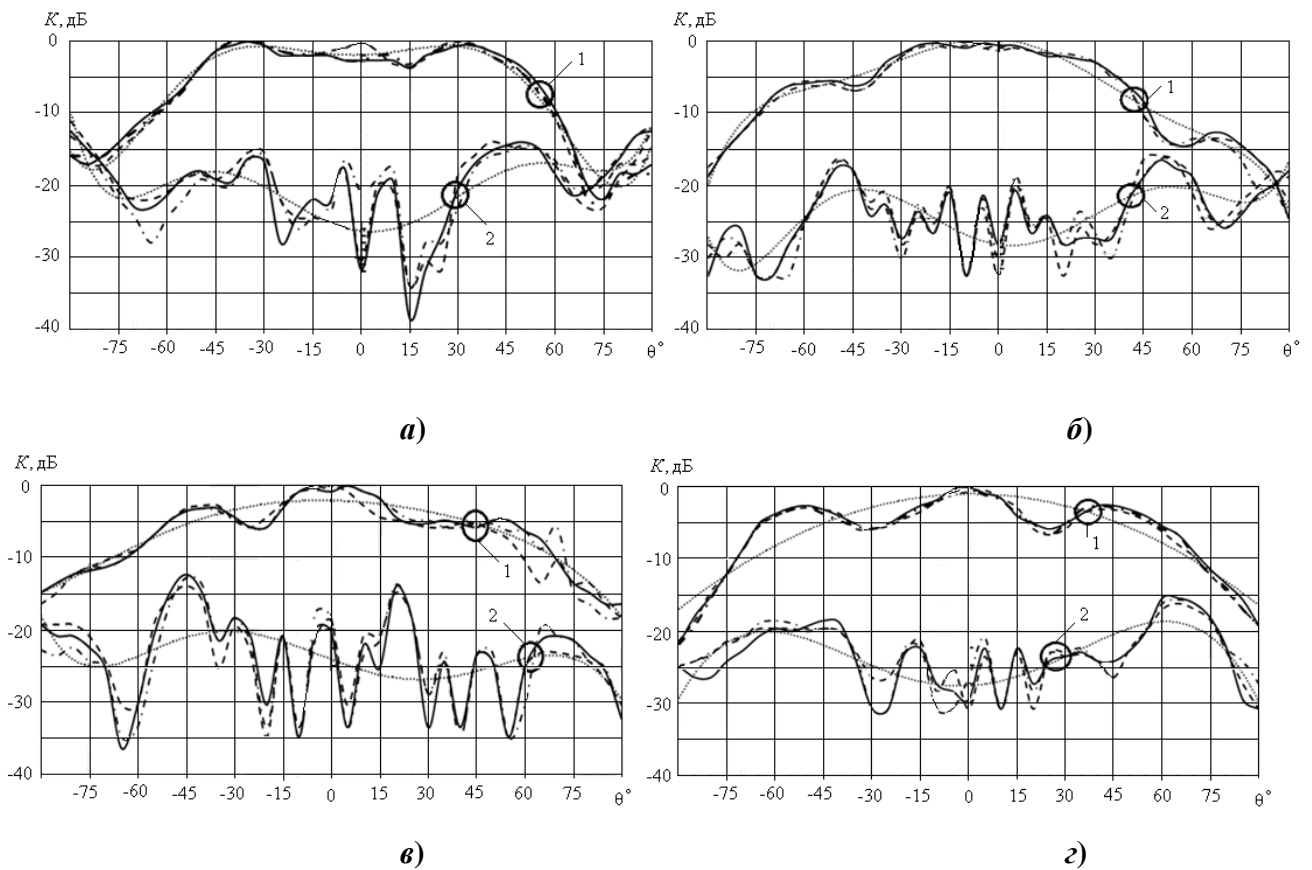


Рис. 2. Диаграмма направленности одиночной щелевой антенны при трех положениях приемной антенны относительно облучателя:

— расстояние между антеннами $l = 390$ мм; - - - - - $l = 395$ мм; - · - · - $l = 440$ мм,
 ······ — аппроксимация полиномом n -й степени;

a – на частоте 15 ГГц с открытыми торцами; b – на частоте 18 ГГц с открытыми торцами; $в$ – на частоте 18 ГГц с металлизированными торцами; $г$ – на частоте 18 ГГц с торцами, покрытыми поглощающим материалом

Отдельная щелевая антенна представляет собой одиночную щель, прорезанную в металлизации одностороннего фольгированного диэлектрика. Экспериментально исследовались антенны на подложке из стеклотекстолита FR-4 толщиной 1,5 мм размером 115×85 мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 5$. Длина щели $L = 8$ мм, ширина щели $W = 0,5$ мм. Антенна облучалась линейно поляризованным излучением открытого конца прямоугольного волновода [2]. Для эксперимента использовалась установка для антенных измерений с квазибездозовой зоной в месте расположения исследуемой антенны [3]. Съём сигнала осуществлялся коаксиальным кабелем, проводники которого присоединялись по разные стороны щели. Результаты измерений диаграммы направленности приведены на рис. 2.

Из рис. 2 $a, б$ видно, что коэффициент кросс-поляризации в пределах угла $\Delta\theta = \pm 10^\circ$ составляет 24 дБ. Данные результаты получены, когда торцы подложки открыты. Аналогичные зависимости для случаев, с торцами подложки, металлизированными и покрытыми поглощающим материалом, приведены на рис. 2 $в, г$. Как видно из приведенных зависимостей, применение поглощающего материала позволяет несколько снизить коэффициент кросс-поляризации за счет подавления поверхностной волны в подложке.

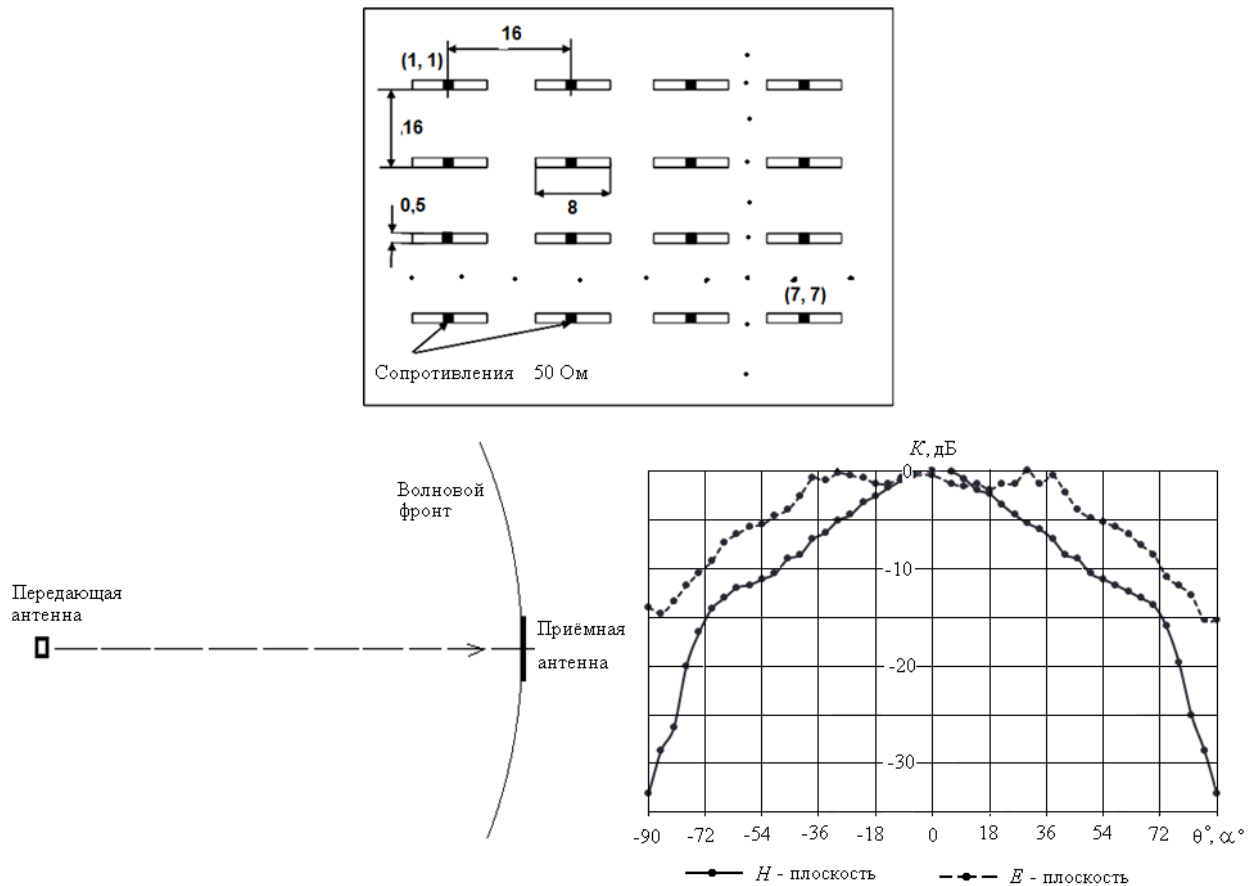


Рис. 3. Исследуемая щелевая антенная решётка:

a – эскиз макета ЩАР; $б$ – взаимное расположение передающей и приемной (исследуемой) антенн; $в$ – диаграммы направленности ЩАР в H - и E -плоскостях

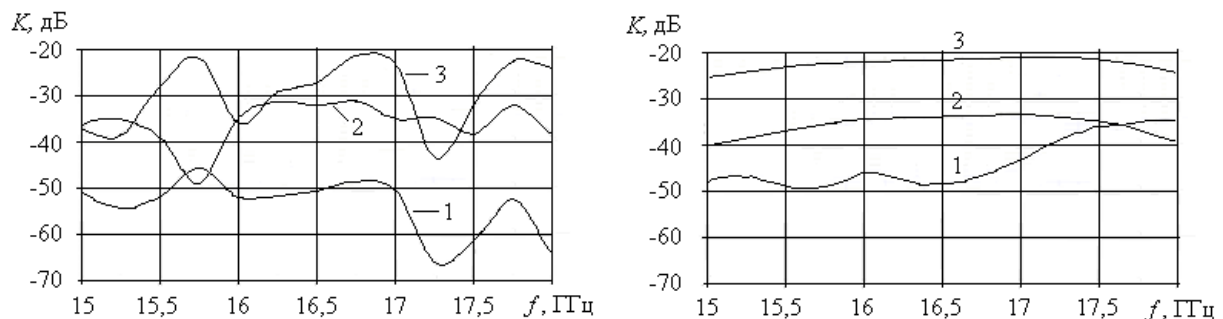
Уровень сигнала космического излучения терагерцового диапазона, принимаемого приемным устройством, очень мал, поэтому для повышения чувствительности складываются отклики отдельных элементов, объединенных в антенные массивы – щелевые антенные ре-

шетки (ЩАР). В связи с этим необходимо исследовать влияние массива элементов ЩАР на поляризационные характеристики отдельного ее элемента. Экспериментальное исследование проводилось на макете антенного массива, состоящего из 49 элементов (щелей), приведенного на рис. 4, а. Взаимное расположение приемной и передающей антенн задавалось таким образом (рис. 4, б), чтобы в пределах поверхности приемной антенны фронт падающего излучения можно было считать плоским.

В случае ЩАР, состоящих из близкорасположенных щелей, имеет место эффект взаимного влияния излучателей друг на друга. При наличии подложки данное влияние существенно возрастает.

Одним из способов количественной оценки этого эффекта является определение коэффициента передачи между элементами, расположенными в разных участках массива:

$$K = 10 \lg \frac{P_{jk}^{np}}{P_{mn}^{изл}},$$



где $P_{mn}^{изл}$ - мощность излучения, идущего от элемента массива с индексами (m,n) ; P_{jk}^{np} - мощность излучения, принятого элементом с индексами (j,k) . Результаты измерений данного коэффициента приведены на рис. 4, а.

а)

б)

Рис. 4. Исследование взаимной связи между элементами массива:

1 – между (1,1) и (1,7); 2 – между (1,1) и (7,7); 3 – между (1,1) и (7,1);

а – экспериментальные данные; б – результаты численного моделирования

Теоретический анализ решеток конечных размеров является сложной электродинамической задачей, поэтому для расчета аналогичных характеристик использовался САПР Ansoft HFSS. Путём моделирования в данном пакете были получены частотные зависимости коэффициентов передачи между щелями, представленные на рис. 4, б. Результаты численного моделирования и эксперимента хорошо согласуются.

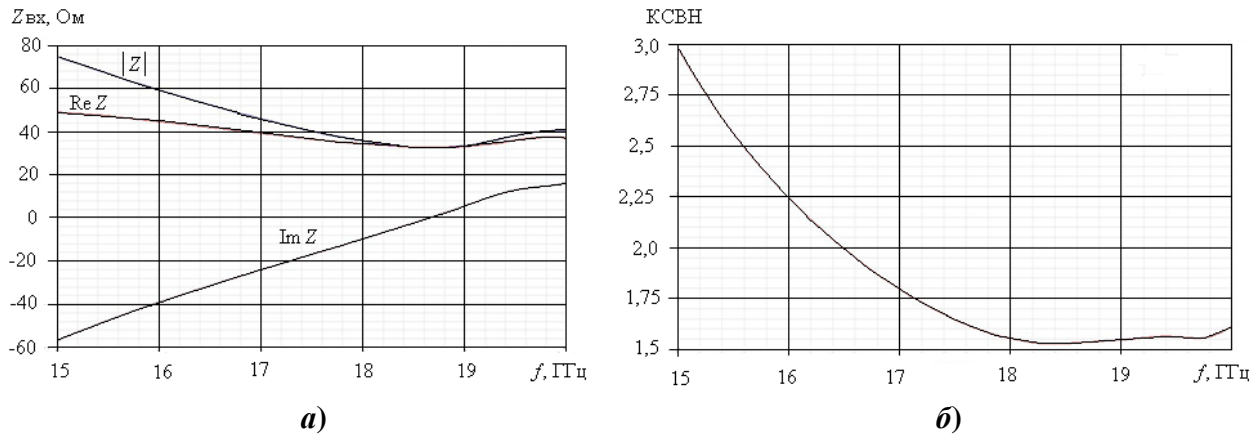


Рис. 5. Волновые характеристики центрального элемента ЩАР:

a – входное сопротивление; *б* – коэффициент стоячей волны напряжения

Также с использованием программы HFSS была рассчитана частотная зависимость входного сопротивления и КСВН центрального элемента антенной решетки. Полученные зависимости представлены на рис. 5. Видно, что данный элемент обладает хорошим согласованием в достаточно широком диапазоне частот.

Другим способом оценки влияния конечности размеров массива на приемные характеристики отдельных его элементов, а также взаимного влияния элементов друг на друга является определение диаграмм направленности (ДН) и уровня кросс-поляризации элементов, расположенных в разных местах массива.

Было проведено несколько серий измерений ДН и уровня подавления излучения паразитной поляризации. При этом сигнал снимался только с одной щели, в то время как все остальные щели нагружались на согласованные нагрузки. Для оценки влияния поверхностных волн подложки (разница в диэлектрических проницаемостях окружающего пространства и диэлектрика существенна) на ее торцах реализовывались различные граничные условия:

- торцы металлизировались, при этом в подложке возникала стоячая волна, экспериментально это проявлялось в увеличении уровня излучения в параллельном плоскости расположения массива направлении, искажении ДН центральных элементов массива и ухудшении подавления волн с ортогональной поляризацией;
- торцы подложки оставались открытыми (нагруженными на окружающее пространство);
- торцы покрывались радиопоглощающим материалом, при этом в подложке осуществлялся режим бегущей волны (рис. 6). Создание режима бегущей волны вдоль подложки позволило усреднить влияние подложечных волн на характеристики элементов массива. При этом в среднем достигается наилучшая развязка по поляризации.

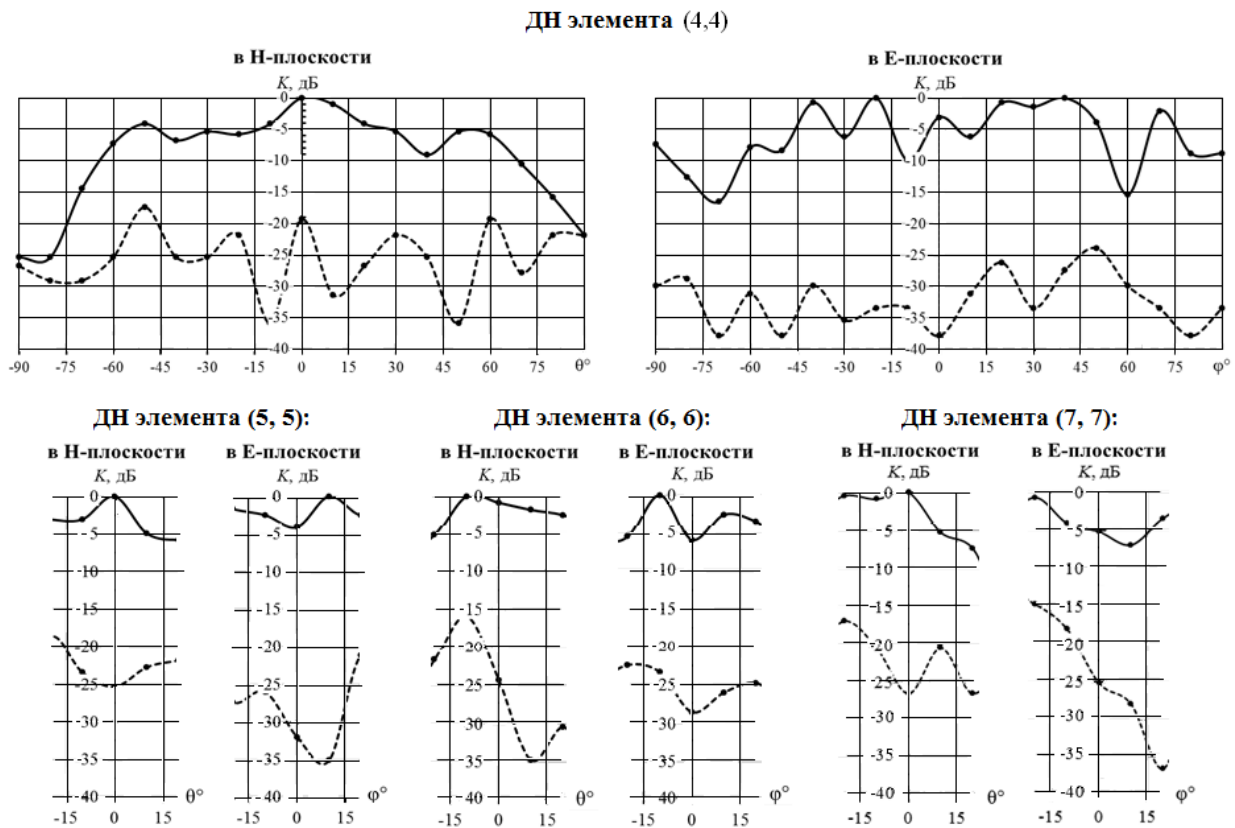


Рис. 6. Диаграммы направленности диагональных элементов массива для волн основной и паразитной поляризации

Наилучшим подавлением волны паразитной поляризации обладают элементы, расположенные в центре массива и близкие к ним. Для них значения развязки по поляризации сопоставимы с показателями для одиночной щели. Эти элементы обладают также симметричной ДН.

Краевые элементы массива имеют меньшие значения коэффициента кросс-поляризации и несимметричную ДН, что может быть объяснено несимметричным окружением элементов и неполным поглощением энергии бегущих подложечных мод поглотителем. Нежелательное излучение в направлении, параллельном плоскости расположения массива, минимально.

Таким образом, объединение щелевых антенн в массив позволяет повысить чувствительность антенной системы при сохранении достаточно высоких поляризационных свойств в широком диапазоне рабочих частот. Однако для получения требуемых характеристик необходимо:

- свести к минимуму влияние подложечных волн обеспечением определенных условий на торцах подложки и выбором оптимальной её толщины и диэлектрической проницаемости;
- использовать для получения полезного сигнала лишь центральную область ЩАР, нагружая периферийные элементы на эквиваленты нагрузок.

Выводы

В статье представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования массива щелевых антенн в СВЧ диапазоне. Результаты расчета основных характеристик массива щелевых антенн хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Библиографический список

1. **Kuzmin, L.** A Parallel/Series Array of Cold-Electron Bolometers with SIN Tunnel Junctions for Cosmology Experiments/ L. Kuzmin // IEEE/CSC & EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM, 2008. №. 3. P. 1–9.
2. **Белов, Ю.И.** Экспериментальное исследование излучающих свойств открытого конца волновода прямоугольного сечения вблизи проводящих объектов / Ю.И. Белов, Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов // Антенны. 2009. Вып. 12(151). С. 18–27.
3. Исследование электромагнитной обстановки в лаборатории микроволновой электродинамики НГТУ / В.В. Бирюков [и др.] // Труды НГТУ. 2012. № 3. С. 126–136.

*Дата поступления
в редакцию 15.07.2013*

V. Biryukov, V. Grachev, G. Malyshev, A. Raevskii, V. Sherbakov

EXPERIMENTAL STUDY OF FINITE PLANAR SLOT ANTENNA ARRAYS

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The study considered finite planar slot antenna arrays (SAA) of finite size as a receiver of extremely weak radiation. It is possible, for example, to register cosmic background radiation.

The study presented examples of measurements results: radiation patterns and cross-polarization factors of different SAA elements, coefficient of mutual communication between different SAA elements.

Moreover, the study presented results of SAA numerical simulation and comparison between the measurement and numerical simulation results.

The study offered recommendations for the creation of SAA with the desired characteristics, for example, it is necessary to provide determinant boundary conditions at the ends of the SAA substrate.

Key words: slot antenna, slot antennas array, radiation pattern, polarization, cross-polarization factor.