

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЛАНАРНОЙ ДИСК-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ

Введение

Низкопрофильные кольцевые планарные антенны потенциально обладают в достаточной степени широким рабочим диапазоном частот. Имея сравнительно малые размеры, такие антенны, а также их аналоги могут быть применяться в терминалах микроволновых систем RFID, GSM, WiFi нового поколения, а также в качестве элементов антенн, предназначенных для излучения или приема широкополосных сигналов [1]. Разработка подобных конструкций и анализ их свойств представляют научный и практический интерес [2].

Анализ характеристик планарных кольцевых антенн, основанный на строгих аналитических методах, сопряжен с определенными трудностями математического характера и зачастую требует использования современных методов, основанных на применении численных способов решения электродинамических задач.

Во многих научных исследованиях при анализе характеристик антенн широко используется численный алгоритм решения интегральных уравнений, с использованием метода моментов (метод Бубнова – Галеркина). Такой метод реализован в качестве базового в пакете программ *FEKO* [3] для компьютерного моделирования с последующим анализом характеристик различного рода антенных элементов и рассеивателей.

В качестве примера можно привести описанное в [4] исследование свойств планарной антенны с излучающим элементом в виде круговой щели переменной ширины, образованной краями отверстия в плоском экране, и кругового диска. Для удобства в последующем будем называть ее диск-щелевой антенной (*disk-slot*, сокращенно *DS*). Предполагается, что источник возбуждения при этом включен между краями отверстия и диска в близкорасположенных точках.

Такая особенность топологии антенны, в сравнении с обычной круговой щелью в экране, способствовала существенному улучшению ее диапазонных свойств. Однако при этом остались неизученными вопросы влияния на частотные свойства антенны, оказываемого наличием реальной линии питания и диэлектрической подложки.

Цель работы – ответить на эти вопросы. Поэтому в данной работе предложена конструкция планарной диск-щелевой антенны с питанием копланарной (*coplanar*, сокращенно *C*) линией, а также исследованы её электродинамические характеристики при наличии диэлектрической подложки (и без нее) для разных вариантов топологии, поэтому для удобства далее обозначим ее как антенна *DSC*. Отметим, что возбуждение антенны, осуществляемое с помощью копланарной линии, не нарушает планарность всей конструкции антенны.

В процессе проведенного компьютерного моделирования в среде *FEKO* характеристики антенны *DSC* с подложкой из диэлектрика сопоставляются с аналогичными характеристиками оной при отсутствии такой подложки.

Постановка задачи и метод ее решения

При проведении расчетов исследовались характеристики на модели антенны, топология которой и расположение в системе координат изображены на рис. 1.

В основе рассмотренных конструкций лежит плоский, хорошо проводящий экран толщиной 0,05 мм с круговым отверстием радиусом R_1 , в его плоскости находится дисковый элемент радиусом R_2 . Этот диск смещен так, что между краями отверстия и диска образована щель с переменной шириной и минимальным поперечным размером d (рис. 1, а). В этом

месте диск соединен с центральным проводником копланарной линии. Ширина t_0 этого проводника примерно равна ширине щели в месте его подключения, а поперечный размер самой копланарной линии t_s равен 2,5 мм.

Вся конструкция (экран, диск, линия питания, рис. 1, б) может лежать на подложке в виде слоя из диэлектрика с малыми потерями толщиной $h = 1$ мм и относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2,5$. То есть материал диэлектрика по своим свойствам близок к фторопласту.

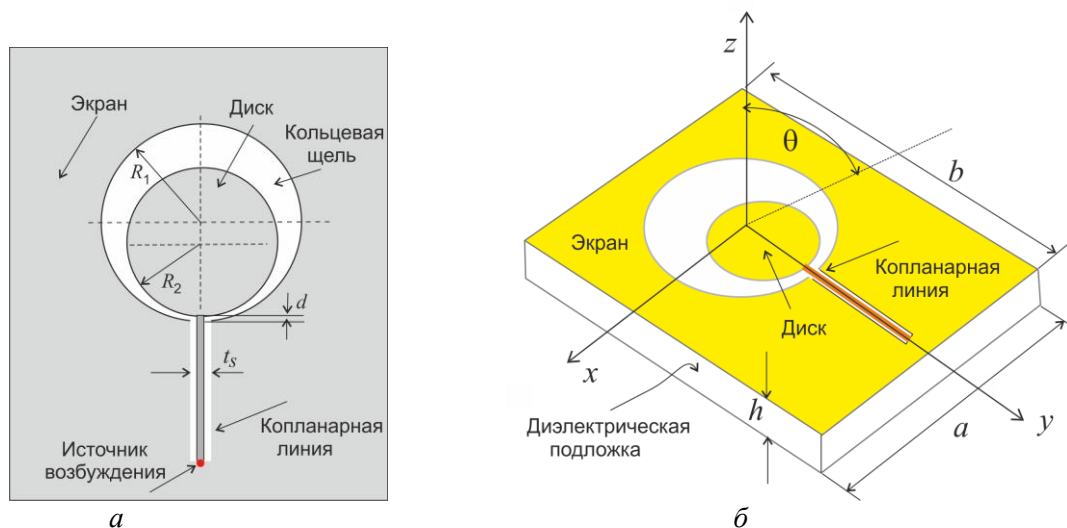


Рис. 1. Геометрическая конфигурация антенны DSC

Геометрические параметры исследуемых моделей антенны DSC :

- размеры экрана $a = 2,5R_0$, $b = 3,0R_0$, где $R_0 = 0,25\lambda_0$;
- радиус отверстия $R_1 = kR_0$;
- радиус диска $R_2 = kR_1$;
- толщина подложки $h = 1$ или 2 мм
- масштабный коэффициент $k = 0,6; 0,7$;
- поперечный размер щели копланарной линии $t_s = 2,5$ мм;
- ширина центрального проводника линии $t_0 = 2$ мм;
- расстояние между ближними краями отверстия и диска $d = 1,0$ либо 2,0 мм;
- λ_0 – расчетная длина волны, соответствующая частоте 2,5 ГГц.

Отметим, что используемый в процессе данных исследований метод моментов предусматривает разбиение элементов антенны на малые по сравнению с длиной волны треугольные сегменты и аппроксимацию электрического тока в пределах таких сегментов и решения системы линейных алгебраических уравнений.

При этом для получения приемлемой точности характерный размер Δl сегмента разбиения должен удовлетворять условию $\Delta l < \lambda / 10$, где λ – длина волны в свободном пространстве.

Такой подход позволяет определить амплитудно-фазовое распределение токов на сегментных элементах и дает возможность корректно рассчитать частотные зависимости импеданса и модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ на входе антенны, а также характеристики поля в дальней зоне и КНД.

В описываемых далее результатах компьютерного моделирования, частота источника возбуждения антенн варьировалась в пределах от 2,0 ГГц до 7,5 ГГц (с шагом 50 МГц), при этом длина стороны сегмента разбиения Δl выбрана такой, чтобы обеспечивалась нужная точность на максимальной частоте данного диапазона.

Результаты численного моделирования

Одними из наиболее важных параметров любой антенны является входной импеданс и его зависимость от частоты, определяющие степень согласования ее с питающей линией.

Для того чтобы иметь возможность сравнивать эти свойства антенн DS и DSC , вначале на рис. 2 показаны графики, иллюстрирующие зависимости импеданса на входе антенны без копланарной линии. Здесь цифрами отмечены такие ситуации: 1 – зазор $d = 2$ мм, подложки нет; 2 – зазор $d = 2$ мм, есть подложка; 3 – зазор $d = 1$ мм, есть подложка. Толщина диэлектрической подложки (при ее наличии) равна 1 мм.

Изображенные на рис. 2 кривые позволяют для трех конструктивных вариантов антенны DS сравнить изменения, происходящие при вариации величины зазора d в месте питания, то есть между диском и краем отверстия в экране.

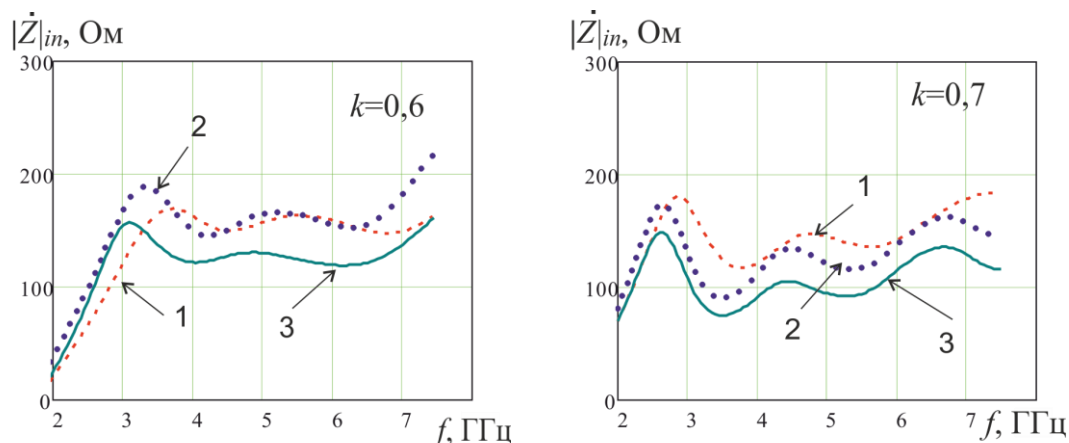


Рис. 2. Частотные зависимости модуля импеданса на входе антенны DS

Анализ зависимостей, изображенных на этих рисунках, позволяет отметить, что слабый осциллирующий характер они имеют в области частот от 3 до 7 ГГц. В этой области на графиках частотной зависимости также заметно смещение кривой $|Z_{in}|$ при изменении величины d – зазора в области источника питания. Можно также отметить, что при $k = 0,6$ усредненное значение $|Z_{in}|$ лежит в пределах 120 – 150 Ом а при $k = 0,7$ – в пределах 100 – 130 Ом. Следовательно, рассматриваемая топология антенн позволяет путем некоторого изменения масштабного коэффициента и величины зазора между диском и краем отверстия, подбирать наиболее приемлемое значение модуля входного импеданса антенны DS .

Аналогичные зависимости импеданса на входе антенны DSC , то есть при питании копланарной линией, показаны на рис. 3. Изображенные на этих рисунках кривые частотных зависимостей иллюстрируют влияние наличия либо отсутствия подложки. Обозначения кривых на этом рисунке такие же, как и на рис. 2. Видно, что наличие подложки приводит, в основном, к смещению кривых в низкочастотную область, мало меняя общий характер самих зависимостей.

Следует отметить резкий рост величины $|Z_{in}|$ в низкочастотной области. Такая особенность проявляется как резонанс в линии питания из-за существенного рассогласования ее со входом антенны в области низких частот. Более сильное влияние на характер частотных зависимостей $|Z_{in}|$ оказывает изменение масштабного коэффициента о чем можно судить сравнивая кривые, изображенные на рис. 3, обратив внимание на характерные частотные области:

- «область рассогласования» ($f \leq 3,0$ ГГц);
- «область излучения» ($3,0 < f < 6,0$ ГГц), где осцилляции импеданса малы.

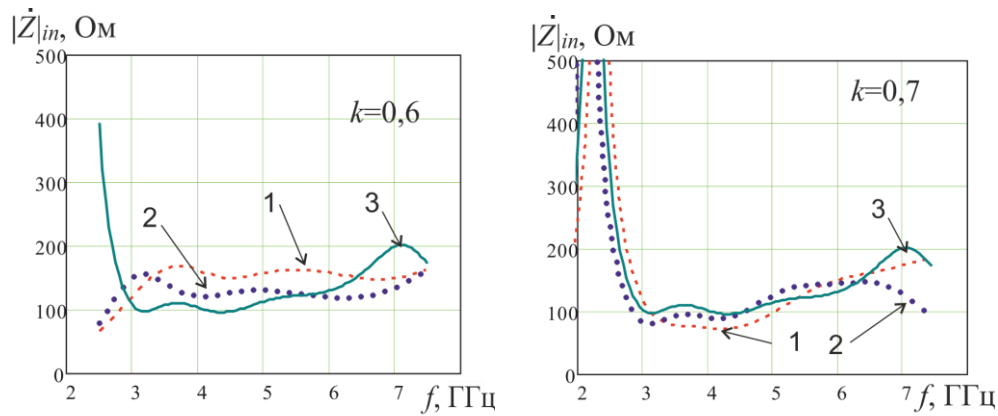


Рис. 3. Зависимости модуля импеданса на входе линии питания антенны *DSC*

Рассмотрев графики зависимостей модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$, изображенные на рис. 4, можно сделать вывод о широкополосных свойствах антенны *DS* и влиянии диэлектрической подложки. Видно, что для антенн без копланарной линии питания наличие подложки приводит в основном к смещению левого края частотного интервала согласования, в пределах которого $|S_{11}| \leq -10$ дБ.

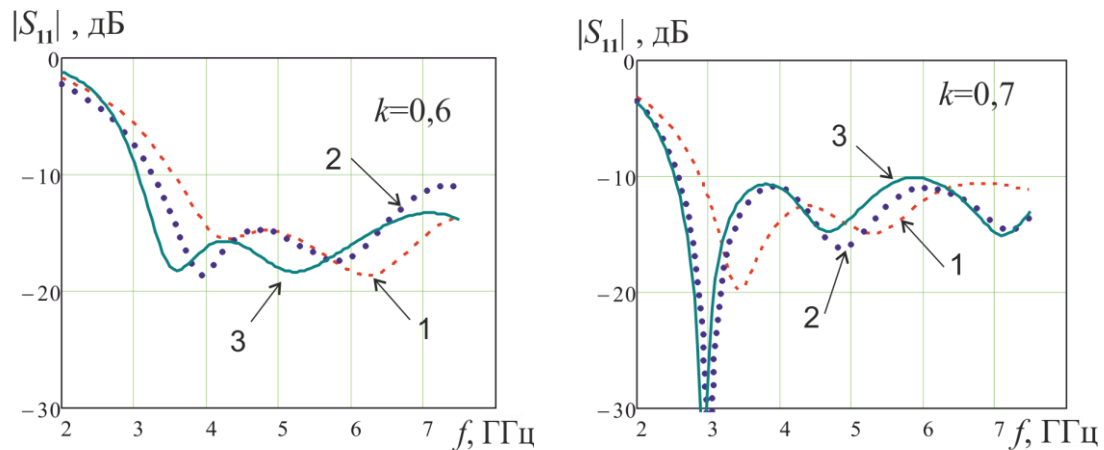


Рис. 4. Частотные зависимости $|S_{11}|$ на входе антенны *DS*

Рассматривая далее частотные свойства антенны *DSC*, отметим предварительно, что характеристическое сопротивление Z_L копланарной линии определяется выражением

$$Z_L = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{ef,t}}} \frac{K(k_t)}{K(k_t')},$$

где $K(x)$ – эллиптический интеграл первого рода, $\varepsilon_{ef,t}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость среды, учитывающая толщину t проводящего экрана. Основные формулы для расчета необходимых величин, входящих в это выражение, приведены в [5].

На рис. 5 показаны графики зависимости характеристического сопротивления копланарной линии от размера ее поперечного сечения t_s при толщине диэлектрической подложки $h = 1$ мм и ширине центрального проводника $t_0 = 2$ мм.

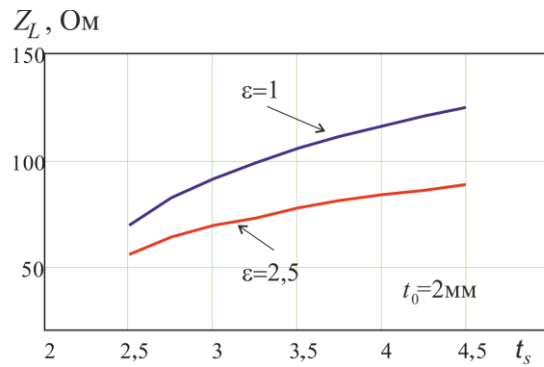


Рис. 5. Зависимость характеристического сопротивления копланарной линии

Видно, что значения Z_L при наличии подложки и её отсутствии ($\epsilon = 1$) отличаются примерно на 30 – 40 Ом.

Зависимости $|S_{11}|$ на входе антенны при питании ее копланарной линией показаны на рис. 6. Видим, что при $k = 0,6$ (рис. 6, а) наилучшее согласование и широкая полоса при $t_s = 2$ мм обеспечивается при активном сопротивлении нагрузки на входе линии питания, равном 120 Ом. Если масштабный коэффициент $k = 0,7$, то более широкая полоса согласования имеет место при $t_s = 1$ мм.

Представленные данные показывают, что путем подбора геометрических параметров антенны и питающей ее копланарной линии нетрудно добиться оптимальных (с точки зрения широкополосного согласования) результатов.

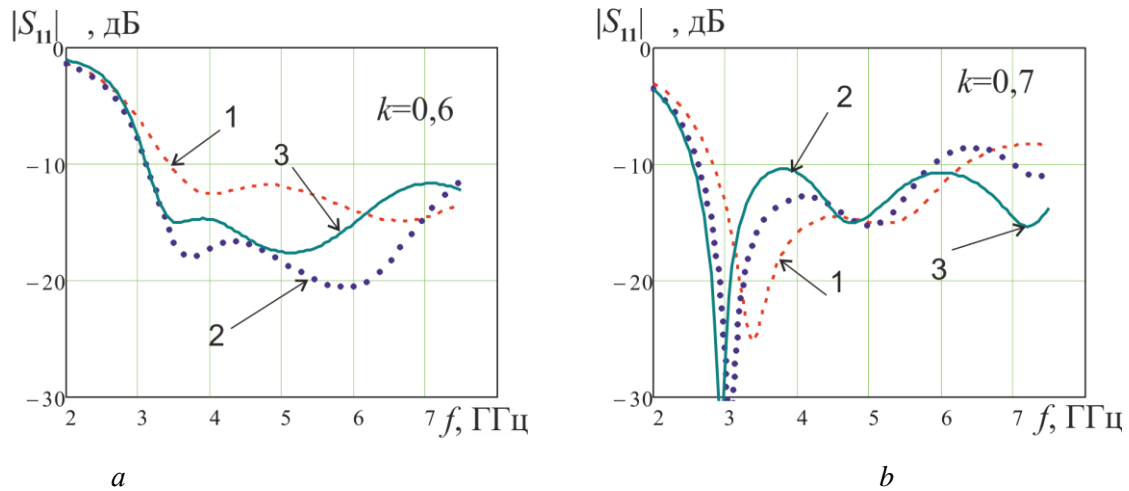


Рис. 6. Частотные зависимости $|S_{11}|$ на входе линии питания антенны *DSC*

Направленные свойства исследуемых моделей антенн иллюстрируют графики частотных зависимостей коэффициента направленного действия (КНД) в направлении нормали к плоскости экрана, изображенные на рис. 7 и 8. Анализируя эти зависимости, нетрудно заметить резкое снижение КНД на высокочастотном краю диапазона.

Такое явление имеет место за счет того, что на высоких частотах максимум главного лепестка диаграммы направленности отклоняется от нормали и возрастают боковые лепестки диаграммы направленности. Причем, этот эффект в значительной мере проявляется при увеличенном размере отверстия ($k = 0,7$).

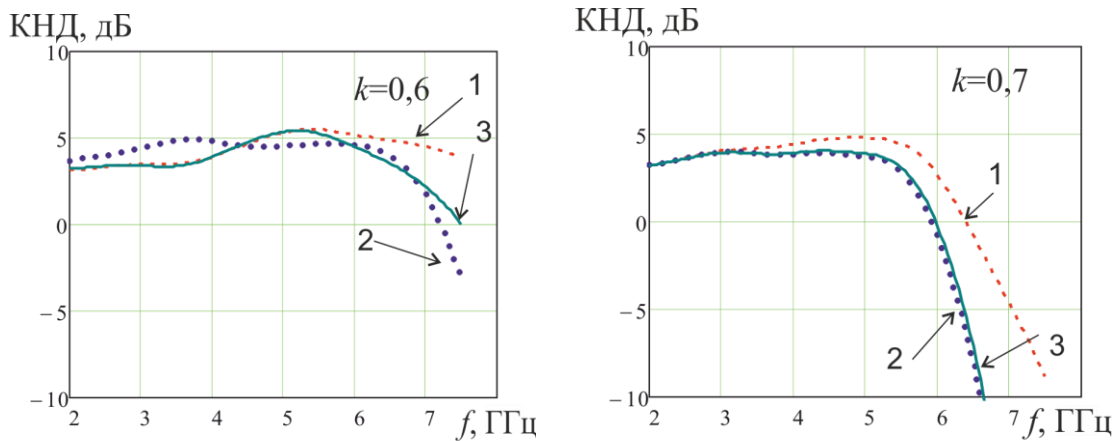


Рис. 7. Зависимости КНД антенны *DS* от частоты

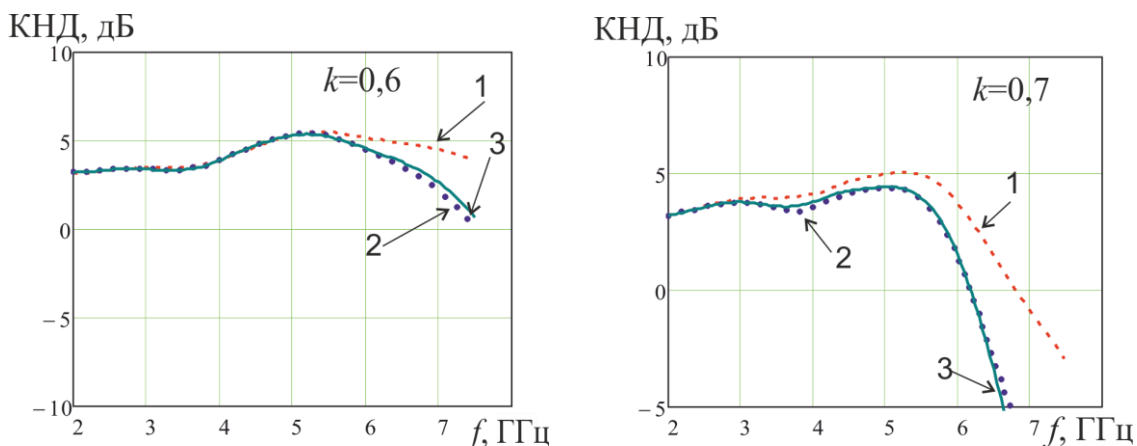


Рис. 8. Зависимости КНД антенны *DSC* от частоты

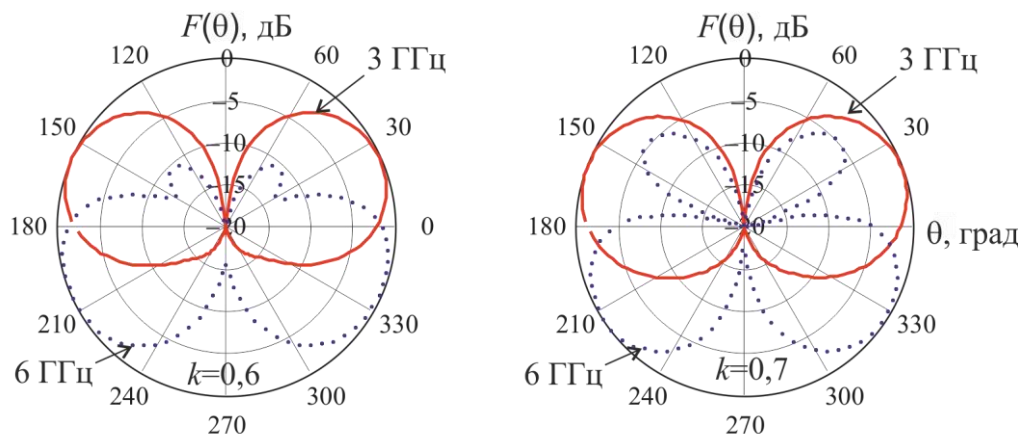


Рис. 9. Зависимости КНД антенны *DSC* от частоты

Характерной особенностью рассмотренной антенны является отклонение главного лепестка от нормали. Причем величина этого отклонения зависит от частоты и лежит в пределах $\pm 30^\circ$ (рис. 9). Однако максимальное значение КНД (с учетом отклонения) изменяется мало и, как следовало ожидать, на высокочастотном краю слегка возрастает.

Наличие копланарной линии и ширина зазора в диапазоне частот упомянутой ранее «области излучения» мало влияют на направленные свойства антенн.

В заключение нужно отметить, что в работе показана топология планарной дисщелевой антенны питаемой копланарной линией и впервые приведены частотные зависимо-

сти ее электродинамических характеристик, основанные на результатах компьютерного моделирования. Питание копланарной линией является отличительной особенностью данной антенны, которая сохраняет планарность конструкции в целом.

Антенны приведенной топологии принадлежат к классу широкополосных, поскольку для них относительная ширина полосы рабочих частот $(f_{\max} - f_{\min})/f_{\text{ср}}$ по согласованию и по характеристикам направленности достигает 120 %.

К дальнейшим направлениям работ по данной тематике можно отнести исследование характеристик и разработку оптимальной топологии антенных решеток на основе дисциплевых антенных элементов с копланарным питанием.

Список литературы:

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. Москва : Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Balanis C. A. Modern antenna handbook. John Wiley & Sons, Canada, 2008. 1680 с.; Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. Москва ; Ленинград : Энергия, 1966. 648 с.
3. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. Москва : ЗАО «НПП «Родник», 2008. 245 с.
4. Цалиев Т.А. Широкополосная кольцевая щелевая антенна // Наук. праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2016. № 1. С. 22-28. Режим доступа: https://ojs.onat.edu.ua/index.php/sbornik_onat/article/view/940/918.
5. Wadell В.С. Transmission line design handbook. Artech House, 1991.

*Одесская национальная академия связи
имени О.С. Попова*

Поступила в редколлегию 17.03.2018