ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2019, № 3, с. 69–75

_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ _____ ТЕХНИКА

УДК 537.87+621.372.8

МАЛОГАБАРИТНАЯ АНТЕННО-ФИДЕРНАЯ СИСТЕМА К.В.Ч.-РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ

© 2019 г. Е. Ю. Гайнулина^{*a*,*}, А. В. Кашин^{*a*}, Н. С. Корнев^{*a*}, А. В. Назаров^{*a*}

^а Филиал РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики "НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова" Россия, 603951, Нижний Новгород, ул. Тропинина, 47

> *e-mail: okatrin@list.ru Поступила в редакцию 30.10.2018 г. После доработки 27.11.2018 г. Принята к публикации 03.12.2018 г.

Представлены результаты разработки антенно-фидерной системы (а.ф.с.) радиоинтерферометра крайне высоких частот (к.в.ч.) с малогабаритным излучателем, предназначенной для диагностики быстропротекающих газодинамических процессов в замкнутых объемах, свободное пространство внутри которых ограничено. На основании численного моделирования и экспериментальных исследований показана принципиальная возможность создания а.ф.с. с размером апертуры не более $(3-5)\lambda$, формирующей осесимметричную диаграмму направленности зондирующего поля с шириной главного лепестка не более $30-40^{\circ}$ и минимальным уровнем бокового излучения. Показано, что требуемые характеристики обеспечиваются благодаря применению излучателей со стержневыми и коническими диэлектрическими вставками определенной конструкции.

DOI: 10.1134/S0032816219030170

введение

Одним из перспективных методов исследования быстропротекающих газодинамических процессов является микроволновая радиоинтерферометрия. Радиоинтерферометры (р.и.) крайне высоких частот (к.в.ч.), разработанные в НИИИС им. Ю.Е. Седакова, позволяют с высокой степенью точности измерять кинематические характеристики (перемещение и скорость) отражающей поверхности, восстанавливать двумерную картину ее деформации в процессе движения [1].

Для решения задач ближней радиолокации и применения в составе микроволновых р.и. были разработаны диэлектрические конические и планарные излучатели, формирующие гауссовы волновые пучки [2-4]. Геометрический размер апертуры таких излучателей в 6-10 раз превосходит длину волны λ. В то же время существует ряд исследовательских задач, когда диагностика газодинамических процессов проводится в замкнутых объемах, свободное пространство внутри которых ограничено. В данном случае излучатель должен формировать максимально узкий осесимметричный зондирующий пучок, обеспечивающий минимальное пятно засветки на исследуемом объекте и имеющий надлежащее амплитудно-фазовое распределение поля излучения в пределах облучаемого участка движущейся в объеме поверхности. При этом габариты излучателя по продольной и поперечным координатам должны составлять не более (3–5)λ.

При проведении измерений в условиях замкнутого объема принципиально важной задачей является также получение минимально возможного уровня боковых лепестков (у.б.л.), формируемой диаграммы направленности (д.н.) и пространственного расположения первых боковых максимумов под наибольшим углом относительно оси излучения основного лепестка, что позволит уменьшить влияние переотраженных сигналов на результат измерений.

СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрены возможности сужения диаграммы направленности зондирующего пучка, формируемого на апертуре малогабаритной а.ф.с. к.в.ч.-радиоинтерферометра, до значений ширины по уровню половинной мощности $\Delta\theta_{0.5} < 40^{\circ}$ с помощью излучателей со стержневыми и коническими диэлектрическими вставками, возбуждение которых в миллиметровом диапазоне длин волн осуществляется одномодовым металлическим волноводом круглого сечения.



Рис. 1. Варианты стержневых диэлектрических излучателей с толщиной, равной (а) или меньшей (б) диаметра м.в.

А.ф.с. должна обеспечивать формирование излучения трехмиллиметрового диапазона длин волн ($\lambda = 3.2$ мм), в том числе через отверстие в металлической или диэлектрической стенке замкнутого объема. В качестве подводящей линии для создаваемой а.ф.с целесообразно использовать металлический волновод (м.в.) минимально возможного сечения. Внутренний диаметр м.в. ограничен снизу критической частотой возникновения основной моды H₁₁ м.в. круглого сечения и составляет 1.87 мм. Таким образом, будем рассматривать металлический канал с внутренним диаметром $d_1 = 2$ мм, чтобы избежать резкого возрастания потерь в волноводе при работе вблизи частоты отсечки основной моды, а внешний диаметр м.в. d₂ выберем равным 3 мм из технологических соображений.

При таком диаметре апертуры, если использовать открытый конец м.в. как излучатель, ширина диаграммы направленности излучения по уровню половинной мощности [5] на рабочей длине волны $\lambda = 3.2$ мм составит не менее 90°, что неприемлемо для поставленной задачи.

Одним из способов сужения д.н. излучения является увеличение апертуры излучающего элемента, что при имеющихся требованиях максимального снижения габаритных размеров антенны может быть реализовано путем расширения эффективного размера поля на апертуре геометрически меньших размеров. В силу специфики диэлектрических волноводов как открытых систем, у волноведущих диэлектрических элементов направленность определяется именно физической апертурой — шириной распределения поля на апертуре излучателя по уровню -15...-20 дБ. Поэтому на торце м.в. было предложено разместить внешнюю диэлектрическую вставку с габаритами не более $(3-5)\lambda$ по продольной и поперечным координатам.

Из-за конечных размеров поперечного сечения такой излучатель создает в пространстве поле с неравномерным амплитудно-фазовым распределением [5], что в дальней зоне проявляется в наличии боковых лепестков диаграммы направленности. В областях нулей распределения поля фаза отраженного от объекта сигнала испытывает скачок на π , что при измерении перемещения от-

ражающей поверхности с помощью р.и. приводит к ошибке, равной $\lambda/4$. Это снижает точность обработки информации о зондируемом объекте по результатам измерений р.и., поэтому при проектировании а.ф.с. необходимо стремиться к снижению у.б.л. и исключению скачков фазы в пределах практически важных углов зондирования, что достигается формированием на апертуре амплитудно-фазового распределения поля, близкого к гауссову [1].

Известен способ формирования гауссова распределения поля на апертуре планарного клинообразного излучателя за счет возбуждения высшей моды в определенном соотношении с основной HE_{11} -модой [6]. Этот подход целесообразно применить и при разработке малогабаритной а.ф.с. Для этого следует рассмотреть диэлектрические излучатели с введенной в определенном сечении резкой нерегулярностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим стержневой диэлектрический излучатель, выполненный из кварца ($\varepsilon = 3.8$) или полистирола ($\varepsilon = 2.5$) с плавным коническим заострением. Диаметр стержня d_c может быть равным (рис. 1а) или меньшим (рис. 1б) внутреннего диаметра м.в. d_1 , длина его внешней (излучающей) части L составляет 10 мм, а длина внутренней части стержня с заострением может варьироваться из технологических соображений, но должна быть не менее 2λ для обеспечения согласования волн круглого металлического волновода и диэлектрической вставки.

У диэлектрического излучателя такого типа физическая апертура зависит от его толщины и материала. Моделирование в программе CST MWS [7] показало, что конструкция излучателя, представленного на рис. 1а, со стержнем из полистирола ($\varepsilon = 2.5$) диаметром d_1 формирует почти симметричный пучок с у.б.л. = -18 дБ, однако ширина д.н. составляет 42° и 44° в *E*- и *H*-плоскостях, соответственно.

Аналогичная конструкция с кварцевым стержнем того же диаметра формирует д.н. шириной 49° и 52° в двух плоскостях, что согласуется с теоретическими предпосылками о формировании поля открытой волноведущей системой, поскольку поле излучателя из кварца имеет меньшую эффективную ширину на апертуре по сравнению с излучателем из полистирола. Учитывая это обстоятельство, в дальнейшем будем рассматривать излучатели из полистирола.

Характерной особенностью рассмотренного излучателя является расположение первого максимума боковых лепестков в районе углов $\pm 60^{\circ}$, что, как отмечалось, является положительным фактором при зондировании объектов в типовых газодинамических опытах, так как при этом обеспечивается минимизация паразитных переотражений.

Для уменьшения габаритов конструкции коническое заострение излучателя может быть усечено, что влечет лишь незначительные (в пределах нескольких градусов) изменения характеристик излучения по отношению к первоначальной конструкции. Предельной следует считать длину такого излучателя L = 7 мм. Дальнейшее его укорочение ведет к неприемлемому расширению д.н. и росту у.б.л.

Излучатель на основе диэлектрического тонкого стержня из полистирола (рис. 1б) с диаметром $d_{\rm c} = 1$ мм, зафиксированного в металлическом канале при помощи пенопластовой вставки, обладает следующим недостатком: при длине внешней части стержня L = 10 мм ширина д.н. излучения сохраняется не менее 42° и 44° в *E*- и Н-плоскостях при у.б.л. до -13 дБ. Уменьшить ширину д.н. до значения 25° позволило бы удлинение стержня до 25 мм, однако в этом случае будет наблюдаться значительный рост у.б.л. вплоть до -10 дБ и выше из-за рассогласования полей металлического и диэлектрического элементов излучателя на торце. Рассогласование тракта на выходе стержня из металлического волновода и, как следствие, у.б.л. можно снизить с помощью представленных на рис. 2 конструкций длиной L = 25 мм, особенностью которых является конусный переход длиной $l_{\rm m} = 5$ мм от стержня диаметром d_1 в канале к тонкому стержню диаметром $d_{\rm c} = 1$ MM.

Использование первой конструкции с плавным переходом (рис. 2a) дает возможность снизить у.б.л. до -13 дБ при уменьшении ширины диаграммы направленности до 25° и 26° в *E*- и *H*-плоскостях, соответственно.

Моделирование показывает, что введение в конструкцию конусного перехода со скачкообразным изменением диаметра сечения (рис. 26) с вдвое меньшего диаметра м.в. ($d_c = 1$ мм) на больший, выбранный равным d = 3 мм, представляет собой нерегулярность, излучение с которой практически не влияет на ширину д.н. При этом повышается эффективность преобразования волны



Рис. 2. Стержневые излучатели с плавным коническим переходом (**a**) и со скачкообразным изменением диаметра сечения (**б**).

м.в. в волну диэлектрического стержня и снижается у.б.л. излучения до значений –15...–17 дБ.

Исключение заостренного участка l_0 внешнего стержня и сокращение длины излучающей части L до 17 мм меняет ширину д.н. незначительно, а полученные при этом характеристики (ширина д.н. 27° в *E*-плоскости и 28° в *H*-плоскости, у.б.л. – не более –14 дБ) удовлетворяют требованиям задач применения. Рис. 3 иллюстрирует результаты моделирования данной оптимизированной конструкции излучателя в сравнении с результатами его экспериментального исследования, которые практически совпадают. Незначительное превышение экспериментального у.б.л. по сравнению с расчетным обусловлено погрешностями измерений.

В качестве альтернативы стержневому излучателю был рассмотрен излучатель с диэлектрической вставкой в форме усеченного конуса, который малым основанием состыкован с торцем м.в. (рис. 4а). Его длина L и диаметр раскрыва D выбраны равными 10 мм. Конус составляет единое целое и является продолжением диэлектрического стержня, введенного в м.в. диаметром $d_1 = 2$ мм.

Моделирование показало, что по уровню до $-10 \, \text{дБ}$ формируется практически симметричный узконаправленный волновой пучок с распределением поля, близким к гауссову. Ширина диаграммы направленности в *E*- и *H*-плоскостях равна 27° и 24° соответственно, у.б.л. не превышает $-20 \, \text{дБ}$.

Рассмотрим возможность оптимизации конического излучателя.

Ранее в работах [1, 6, 8] была рассмотрена перспективность применения в составе р.и. диэлектрических излучателей, формирующих гауссов волновой пучок. Было показано, что излучатели, на выходе которых формируется волновой пучок в виде основной моды Гаусса–Эрмита (или гауссов пучок нулевого порядка), обеспечивают значительно бо́льшую точность измерений при диагностике газодинамических процессов за счет существенного уменьшения уровня боковых лепестков.



Рис. 3. Диаграмма направленности в плоскостях E (a) и H (б), формируемая усеченным стержневым излучателем со скачкообразным изменением диаметра сечения и длиной внешней части 17 мм.

Планарный излучатель, обладающий указанными свойствами, защищен патентом РФ [4]. Одним из способов формирования гауссова распределения на апертуре излучателя является возбуждение высшей моды в определенном соотношении с основной модой, поэтому был предложен конический излучатель с резкой нерегулярностью в виде скачкообразного изменения диаметра сечения диэлектрического элемента с внутреннего диаметра м.в. $d_1 = 2$ мм на диаметр d = 3.1 мм непосредственно на выходе из металлического канала (рис. 4б).

Такое решение позволило получить существенно лучшие по сравнению с диэлектрическим конусом без резкой нерегулярности параметры излучения: более осесимметричный волновой пучок гауссова типа с шириной основного лепестка д.н. в пределах 25° по уровню –3 дБ при более низком у.б.л., не превышающем –21 дБ, с равномерным распределением фазы без скачков в пределах основного лепестка д.н. до уровня –19 дБ. Результаты моделирования, представленные на рис. 5, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Полученный результат объясняется выбором диаметра малого основания конуса *d* равным



Рис. 4. Диэлектрический конический излучатель (**a**) и излучатель со скачкообразным изменением диаметра сечения (**б**).

$$d = \frac{1.22\lambda}{\sqrt{\varepsilon - 1}},$$

что соответствует диаметру эквивалентного круглого диэлектрического волновода, при котором возбуждается волна типа HE_{12} , следующего за основным HE_{11} [9].

При $\lambda = 3.2$ мм и $\varepsilon = 2.5$ диаметр малого основания конуса *d* составляет 3.1 мм. В этом случае на резкой нерегулярности эффективно возбуждается волна указанного высшего типа, которая в сочетании с основной волной типа HE₁₁ обеспечивает формирование д.н. гауссова типа. Моделирование излучателя с большей величиной *d* и, следовательно, большим числом возбуждаемых волн показало существенное ухудшение характеристик излучения.

Габариты излучателя можно сократить, уменьшив диаметр апертуры D до 5 мм и длину излучающей части L до 2.85 мм. Эксперимент показал, что такой излучатель формирует гауссов волновой пучок с шириной, равной 37° в E-плоскости, 39° в H-плоскости, и у.б.л., не превышающим -21 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований подтверждают принципиальную возможность создания антеннофидерной системы к.в.ч. радиоинтерферометра, формирующей зондирующий пучок с шириной д.н. 30–40° с помощью излучателей с диэлектрическими вставками размером по продольной и поперечным координатам не более $(3-5)\lambda$.

В табл. 1 приведены в сравнении характеристики рассмотренных вариантов диэлектрических излучателей из полистирола.

У излучателей с коническими вставками диаметром раскрыва D = 10 мм достигается минимальная (из исследованных моделей) ширина д.н. при минимальном у.б.л. (табл. 1, варианты 7 и 8, рис. 5). Формируемый практически симметричный узконаправленный волновой пучок шириной $\Delta \theta_{0.5} \sim 24^{\circ}$ с распределением поля, близким к гауссову, дает более чем трехкратное сужение д.н. излучателя по сравнению с открытым концом металлического волновода.

Уменьшение D до 5 мм приводит к увеличению $\Delta \theta_{0.5}$ до 39° (табл. 1, вариант 9). Данный вариант излучателя перспективен для радиоинтерферометрических задач, когда не предъявлены жест-кие требования к ширине зондирующего пучка, при этом имеются существенные ограничения по габаритам а.ф.с. при установке внутрь компактных измерительных узлов.

Примерно на такой же физической апертуре у излучателей с заостренной или усеченной стержневой вставкой без конического перехода обеспечивается $\Delta \theta_{0.5} \sim 43^{\circ}$ (табл. 1, варианты 1–3). Установлено, что использование конструкции стержня с плавным переходом в месте выхода из металлического волновода и увеличение его длины даже до L = 17 мм приводит к существенному сужению ширины диаграммы направленности до $\Delta \theta_{0.5} \sim 27^{\circ}$ (табл. 1, вариант 6, рис. 3) и с еще бо́льшим сужением при дальнейшем удлинении.

Уровень боковых лепестков определяется в значительной степени согласованием диэлектрического излучателя на выходе из металлического волновода, что определяет как к.с.в.н. (коэффициент стоячей волны по напряжению) тракта а.ф.с., так и уровень паразитного излучения. Применение излучателей с конусными вставками со скачкообразным изменением диаметра сечения (табл. 1, варианты 8 и 9) позволяет обеспечить у.б.л. не более – 20 дБ. Реализованные на описанном в [6, 7] принципе формирования на выходе структуры гауссового волнового пучка излучатели обеспечивают значительно большую точность измерений при диагностике газодинамических процессов. В дальней зоне такие излучатели обеспечивают д.н., близкую к преобразованию Фурье от функции Гаусса, тем самым устраняя проблему влияния скачков фазы на результаты радиоинтерферометрических измерений.

Для применения в составе р.и. при зондировании объектов как в открытых, так и в замкнутых объемах следует выделить излучатель с укороченной конической вставкой со скачкообразным изменением диаметра сечения (табл. 1, вариант 9), у



Рис. 5. Диаграмма направленности в плоскостях E (**a**) и H (**б**), формируемая коническим излучателем со скач-кообразным изменением диаметра сечения (рис. 46).

которого паразитное боковое излучение практически не облучает зондируемую поверхность — в формируемой им д.н. минимумы основного лепестка находятся в районе углов $\pm (60-70^\circ)$, а первый боковой лепесток имеет максимум в направлении углов $\pm (90-100^\circ)$ относительно направления максимума основного лепестка. Это свойство позволит избежать множественных переотражений, искажающих результат.

Излучатели к.в.ч.-радиоинтероферометров со стержневыми и коническими диэлектрическими вставками позволяют обеспечить узконаправленность излучения и у.б.л., не достижимые при использовании металлических одномодовых или рупорных излучателей с теми же размерами, а также излучателей с известными формами диэлектрических вставок на открытом конце металлического волновода, используемых в диагностических измерениях для задач, где не предъявляются жесткие требования к малым габаритам измерительных устройств, узкой направленности излучения или минимизации у.б.л.

Разработанная малогабаритная а.ф.с. к.в.ч.радиоинтерферометра с рассмотренными типами излучателей обладает электрическими характеристиками, позволяющими существенно повысить информативность радиоинтерферометрических измерений для широкого диапазона исследова-

Варианты излучателя	Геометрия излучателя, параметры конструкции	Ширина главного лепестка д.н.в <i>Е/Н</i> - плоскостях	Уровень боковых лепестков, дБ	Направление первого бокового лепестка
 Стержневой с заостре- нием 		42°/44°	-18	$\pm 60^{\circ}$
2. Стержневой с усечен- ным заострением	L = 10 MM	42°/44°	-17	$\pm 60^{\circ}$
 Стержневой тонкий с заострением 	$L = 10 \text{ MM}, d_0 = 1 \text{ MM}$	42°/43°	-13	$\pm 60^{\circ}$
4. Стержневой с плавным коническим переходом	d_{c1}	25°/26°	-13	±40°
 Стержневой со скачко- образным изменением диаметра сечения 	$L = 25 \text{ MM}, d_c = 1 \text{ MM}, d_{\Pi} = 5 \text{ MM}$ $L = 25 \text{ MM}, d_c = 1 \text{ MM}, d = 3 \text{ MM}, d_{\Pi} = 5 \text{ MM}, l_{\Pi} = 5 \text{ MM}, l_{\Pi} = 4 \text{ MM}$	24°/25°	-17	$\pm 40^{\circ}$
б. Стержневой без заост- рения со скачкообраз- ным изменением диаметра сечения	$L = 17 \text{ MM}, d_c = 1 \text{ MM}, d = 3 \text{ MM}, l_{\Pi} = 5 \text{ MM}$	27°/28°	-14	±40°
7. Конический	d_2 d_1 d_2 d_1 d_1 d_2 d_1 d_2 d_1 d_2 d_1 d_2 d_1 d_2 d_3 d_1 d_1 d_2 d_3 d_1 d_2 d_3 d_1 d_2 d_3 d_3 d_1 d_3 d_1 d_3 d_1 d_2 d_3	27°/24°	-20	±60°

Таблица 1. Сравнение вариантов диэлектрических излучателей из полистирола (параметры конструкций приведены при постоянных параметрах круглого м.в. $d_1 = 2$ мм, $d_2 = 3$ мм)

Т

Таблица 1. Окончание

Варианты излучателя	Геометрия излучателя, параметры конструкции	Ширина главного лепестка д.н.в <i>Е/Н</i> - плоскостях	Уровень боковых лепестков, дБ	Направление первого бокового лепестка
8. Конический со скачко-	\uparrow	25°/23°	-21	$\pm 60^{\circ}$
образным изменением сечения	d_{2} d_{2} d_{2} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{1} d_{2} d_{1} d_{1} d_{1} d_{2} d_{1} d_{1} d_{1} d_{2} d_{1} d_{1} d_{1} d_{2} d_{1} d_{1} d_{2} d_{1} d_{1} d_{2} d_{1} d_{2} d_{1} d_{2} d_{1} d_{2} d_{1} d_{2} d_{1} d_{2} d_{1} d_{2} d_{1} d_{2} d_{1} d_{2} d_{2} d_{1} d_{2} d_{2} d_{1} d_{2} d_{2} d_{1} d_{2} d_{2} d_{1} d_{2} d_{2} d_{1} d_{2} d			
9. Укороченный кониче- ский со скачкообразным изменением сечения	d_2 D d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_1 d_2 d_1 d_1 d_1 d_1 d_2 d_1 d_1 d_1 d_1 d_2 d_1 d_1 d_1 d_2 d_1 d_1 d_1 d_2 d_1 d_1 d_1 d_1 d_2 d_1 d_1 d_1 d_2 d_1 d_1 d_2 d_1 d_2 d_1 d_1 d_2 d_1 d_2 d_1 d_2 d_1 d_2 d_1 d_2 d_2 d_1 d_2 d_2 d_2 d_3 d_1 d_2 d_3 d_1 d_2 d_3 d_1 d_2 d_3 d_1 d_2 d_3 d_3 d_1 d_2 d_3 d_3 d_1 d_2 d_3 $d_$	37°/39°	-20	±90°

тельских задач, в том числе при установке а.ф.с. в измерительные узлы, свободное пространство внутри которых сильно ограничено, когда применение существующих на сегодняшний день а.ф.с. не представляется возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Канаков В.А., Катин С.В., Корнев Н.С., Михайлов А.Л., Назаров А.В., Орехов Ю.И., Родионов А.В., Хворостин В.Н. // Антенны. 2016. Вып. 1 (221). С. 49.
- 2. Панкратов А.Г., Родионов А.В., Гайнулина Е.Ю., Хворостин В.Н., Взятышев В.Ф. Патент № 2485644 РФ. МПК Н01Q 13/00 // Опубл. 20.06.2013. Бюл. № 17.
- Взятышев В.Ф., Гайнулина Е.Ю., Орехов Ю.И., Родионов А.В. Патент № 2515700 РФ. МПК Н01Q 13/00 // Опубл. 20.05.14. Бюл. № 14.

- Гайнулина Е.Ю., Штыков В.В., Назаров А.В., Седов А.А., Хворостин В.Н. Патент № 2578660 РФ. МПК Н01Q 21/00 // Опубл. 27.03.16. Бюл. № 9.
- 5. *Марков Г.Т., Сазонов Д.М.* Антенны: учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. М.: Энергия, 1975.
- 6. Гайнулина Е.Ю., Штыков В.В. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 8/3. С. 5.
- http://www.eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/ CST-MICROWAVE-STUDIO.phtml
- Взятышев В.Ф., Гайнулина Е.Ю., Марков А.В., Назаров А.В., Родионов А.В., Седов А.А., Хворостин В.Н., Штыков В.В. // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: труды междунар. конф. "XVI Харитоновские тематические научные чтения". Саров, 2015. С. 810.
- 9. *Взятышев В.Ф.* Диэлектрические волноводы. М.: Сов. радио, 1970. С. 212.