

09

Влияние эллиптичности диэлектрических резонаторов на вынужденные колебания типа шепчущей галереи

© А.Е. Когут

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,
Харьков

E-mail: maksim@ire.kharkov.ua, koguts@ic.kharkov.ua

В окончательной редакции 25 июля 2002 г.

Изучено влияние эллиптичности диэлектрического резонатора на колебания типа шепчущей галереи, возбуждаемые сосредоточенным источником излучения. Экспериментально исследованы зависимости спектральных характеристик и распределения полей колебаний от направления распространения в резонаторе образующих их волн шепчущей галереи.

Сферические и полусферические диэлектрические резонаторы (ДР) с колебаниями типа шепчущей галереи (ШГ) обладают признанными достоинствами в миллиметровом диапазоне длин волн, из которых наиболее важными являются высокие значения собственной добротности [1]. Это делает особенно привлекательным эти резонаторы при создании высокостабильных генераторов и сумматоров мощности, адекватных миллиметровому диапазону [2]. Высокие показатели электродинамических характеристик сферических ДР с колебаниями типа ШГ определяются отсутствием резких границ резонатора и узкими областями локализации полей колебаний на его поверхности [3].

Эллиптичность ДР нарушает центральную симметрию резонатора и может привести к ряду интересных эффектов, связанных с изменением его спектральных характеристик и изменением распределения полей вынужденных колебаний [4]. С позиций геометрических представлений вариация малых и больших осей эллипсоида может привести к появлению приоритетного направления лучевого потока в резонаторе и образованию на его поверхности областей, закрытых для полей колебаний [5].

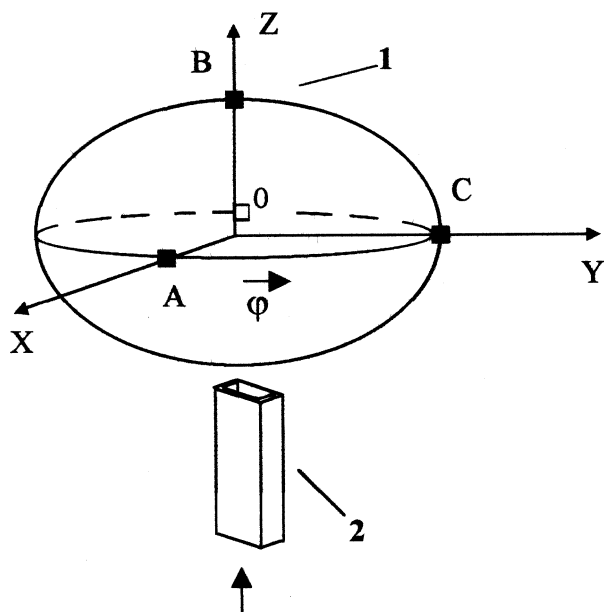


Рис. 1. Объект экспериментальных исследований.

Проведенные исследования собственных колебаний эллипсоидов вращения создают предпосылку для исследования характеристик вынужденных колебаний типа ШГ. В качестве объекта исследований целесообразным является выбор диэлектрического эллипсоида с незначительным по сравнению с длиной волны различием длин его геометрических осей. Изменение направления распространения волн в резонаторе с малым градиентом кривизны путем перемещения источника излучения по одной из криволинейных координат позволит проследить динамику изменения спектральных и энергетических характеристик колебаний: от спектра резонатора, близкого по своим электродинамическим свойствам к диэлектрической сфере, до спектра колебаний эллипсоидального резонатора, и провести их сравнительный анализ. Под градиентом кривизны подразумевается различие кривизны поверхности эллипсоида на разных ее участках. Очевидно, что для достижения поставленной

цели угол расхождения волн вдоль эллиптической поверхности ДР должен быть малым.

На рис. 1 показан объект экспериментальных исследований. Диэлектрический двухосный вытянутый эллипсоид 1 и источник излучения волн 2 находятся в держателе (на рис. 1 не показан). Эллипсоид, выполненный из фторопласта, имеет малые геометрические полуоси $|OA| = |OB| = 19 \text{ mm}$ и большую полуось $|OC| = 20 \text{ mm}$. В качестве источника излучения использовался открытый конец прямоугольного металлического волновода размерами в поперечном сечении $7.2 \times 3.4 \text{ mm}$. Задача согласования подводящего металлического волновода с окружающим пространством, в том числе и с ДР, обладающим более высоким волновым сопротивлением, решалась путем заполнения волновода диэлектриком (фторопласт). Открытый конец волновода располагался на расстоянии $1\text{--}1.5 \text{ mm}$ от поверхности ДР. Держатель резонатора изготовлен из материала с величиной диэлектрической проницаемости, близкой к вакууму (пористый пенопласт).

Экспериментальные исследования были проведены в диапазоне частот $27\text{--}36 \text{ GHz}$. Измерения резонансных частот колебаний проводились с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны (КСВН). По величине КСВН устанавливались уровни связи источника излучения волн с полями вынужденных колебаний исследуемого ДР и определялись амплитуды резонансных откликов колебаний. Идентификация мод и измерения распределения их полей на поверхности эллипсоида осуществлялись методом пробного тела [6]. Измерения спектров вынужденных колебаний проводились при изменении азимутальной координаты φ_i источника излучения в плоскости сечения резонатора XOY , образованной пересечением его большой и малой осей (рис. 1). Положение источника при этом характеризуется его координатой φ_i , отсчет которой ведется от плоскости, образованной пересечением малых осей эллипсоида (E — плоскость волновода лежит в плоскости малых осей).

При произвольном значении координаты φ_i источника излучения в спектре вынужденных колебаний типа ШГ исследуемого ДР одновременно присутствуют $TM_{nml}(E_r \neq 0)$ и $TE_{nml}(E_r = 0)$ моды (E_r — радиальная составляющая вектора напряженности электрического поля; индексы n, m, l обозначают число вариаций поля по полярной θ , азимутальной φ и радиальной r координатам соответственно). Эффективность возбуждения колебаний TE поляризации мала по сравнению с

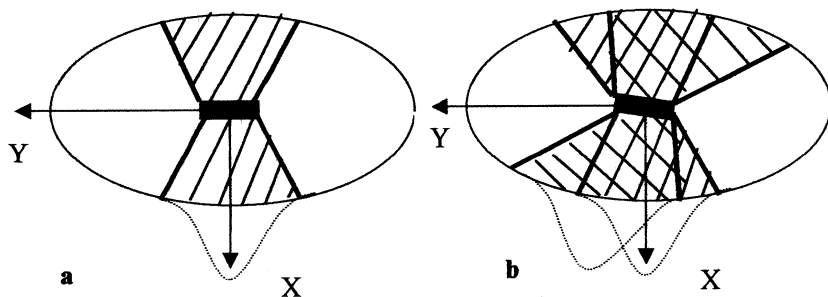


Рис. 2. Схематическое изображение областей локализации полей колебаний типа $ШГ$ на поверхности диэлектрического эллипсоида.

эффективностью возбуждения $ТМ$ мод, в связи с чем в данной работе они не рассматривались. Резонансные отклики $ТМ$ колебаний образуют по шкале частот почти периодическую зависимость. Расстояние между соседними резонансными частотами близко к 1.4 GHz.

При $\varphi_i = 0$ поля $ТМ$ колебаний на поверхности ДР локализуются в областях, имеющих форму неоднородных поясков (заштрихованная область на рис. 2, *a*). Расположение источника излучения относительно осей эллипсоида схематически показано на рис. 2 черным прямоугольником. Сужения поясков полей располагаются в области источника и в его отображении. В области между ними поясок расширяется и на резонансной частоте $f = 33.864$ GHz его наибольшая ширина составляет 31 mm. Наименьшая ширина пояска близка к длине широкой стенки волновода — 7.2 mm. Малые геометрические оси эллипсоида при этом лежат в центральном сечении пояска поля колебания. Максимум интенсивности поля колебания с одной вариацией поля в поперечном сечении пояска находится на середине ширины пояска и в эксперименте определяется по наибольшему изменению амплитуды резонансного отклика при внесении малой поглощающей неоднородности в поле колебания. Качественное распределение интенсивности поля колебания показано на рис. 2, *a* пунктиром. Отметим, что при используемых размерах ДР в нем не возбуждаются высшие азимутальные моды с $m > 1$.

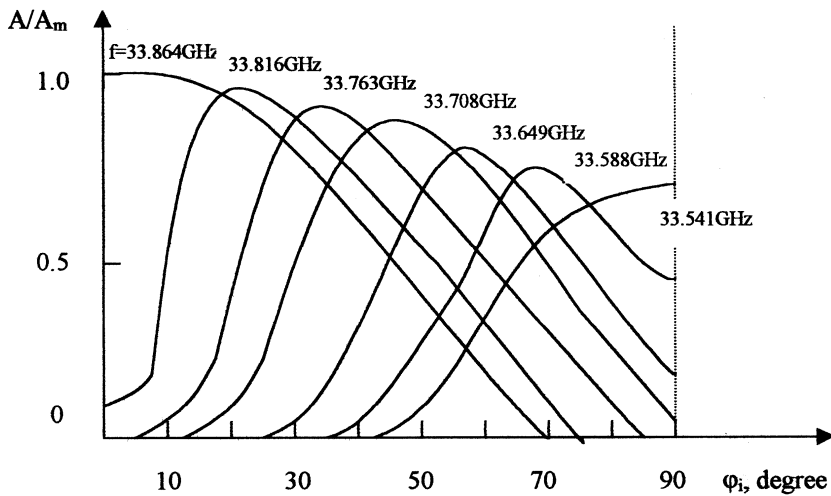


Рис. 3. График зависимости амплитуды резонансных откликов колебаний A , приведенной к ее наибольшему значению A_m от координаты φ_i источника излучения.

Даже при незначительном изменении координаты φ_i источника излучения относительно $\varphi_i = 0$ частота резонансного отклика понижается и поясok поля деформируется. Ширина резонансного отклика увеличивается, а сам он представляет совокупность более мелких резонансов. Результаты идентификации соответствующих им колебаний показали, что они соответствуют одной моде с одинаковыми значениями индексов n , m , l . Различие между ними заключается лишь в частоте, они образованы волнами, распространяющимися вдоль поверхности диэлектрика по различным траекториям, отличающимся своей формой и протяженностью.

Свидетельством одновременного появления нескольких криволинейных диэлектрических волноводных каналов являются результаты исследования распределения полей колебаний на поверхности эллипсоида (рис. 2, *b*). Каждому из них соответствует неоднородный по форме поясok поля. Пояски полей колебаний имеют общие области сужения — в месте расположения источника излучения и в его отображении, и пространственно разделены на периферии расширенной части. Смеще-

ны относительно друг друга и точки максимумов интенсивностей их полей. В области наибольшего расширения поля колебаний частично перекрываются и их совокупность представляет собой суммарное пятно поля в виде неоднородного по форме пояска с выраженными сужениями и расширением между ними. Размеры суммарного пояска полей колебаний зависят от количества возникших колебаний и определяются координатой φ_i источника излучения. Зависимость амплитуды резонансного отклика колебания, приведенной к ее наибольшему значению, A/A_m от величины φ_i , представленная графически на рис. 3, позволяет судить о количестве одновременно возбуждаемых в исследуемых ДР колебаний, соответствующих одной моде, а также об эффективности их возбуждения. Видно, что наибольшее число резонансных откликов колебаний $N = 7$ наблюдается в интервале изменения φ_i от 30° до 70° ($f \approx 33.86$ GHz). При дальнейшем увеличении величины φ_i до 90° число возбуждаемых колебаний уменьшается и в предельном случае ($\varphi_i = 90^\circ$) их количество составляет $N = 3$. Резонансные отклики колебаний, образованных при увеличении координаты φ_i источника излучения в интервале ее значений $0-90^\circ$ занимают низкочастотный участок спектральной кривой, соответствующей их общей моде, поскольку образующие их волны распространяются в ДР вдоль больших по длине траекторий. Эффективность возбуждения таких колебаний с увеличением φ_i понижается. Можно предположить, что низкая эффективность их возбуждения определяется более высокими радиационными потерями энергии в связи с влиянием градиента кривизны поверхности диэлектрического эллипсоида. Отметим, что каждому колебанию на графике зависимости $A/A_m(\varphi_i)$ соответствует своя точка максимума эффективности возбуждения. Координаты φ_i максимумов эффективностей возбуждения колебаний, соответствующих одной моде и различающихся по частоте, различны.

Более подробную информацию о величине потерь энергии колебаний в ДР несет их собственная добротность. Однако в условиях эксперимента ее определение затруднено из-за „размытости“ резонансной кривой, что связано с одновременным возбуждением нескольких колебаний на близких частотах.

Как показали результаты измерения размеров поясков полей колебаний типа ШГ на поверхности исследуемого ДР, их ширина изменяется от одной до нескольких длин волн. В соответствии с этим можно сделать вывод о том, что изменяются и размеры пучка волн

ШГ, распространяющегося вдоль поверхности резонатора. Подобные закономерности распределения полей колебаний, формируемых пучком волн ШГ, ранее были обнаружены в квазиоптических полусферических ДР. Их интерпретация была проведена с позиций геометрической оптики [3]. В связи с этим объяснение результатов электродинамических исследований, проведенных в данной работе, также можно провести на основе геометрических приближений. При расположении H -плоскости волновода перпендикулярно плоскости, образованной пересечением малых осей двухосного эллипсоида, крайние лучи, исходящие из источника под одинаковыми углами, падают на эллиптическую поверхность ДР под одинаковыми углами вследствие одинаковой кривизны поверхности в точках падения. Распространяясь вдоль поверхности по траекториям, близким к коническим, они проходят одинаковый путь, сходясь в области отображения источника. При этом наблюдается эффект фокусировки волн шепчущей галереи, наблюдаемый ранее для диэлектрической полусферы, расположенной на плоском металлическом зеркале [3]. В противном случае различная кривизна поверхности ДР в точках падения лучей определяет и различные траектории прохождения лучей в эллипсоиде, отличающиеся по форме, длине и расположению относительно геометрических осей ДР. Форма поясков полей колебаний определяется направлением распространения лучей вдоль криволинейной поверхности резонатора.

Эффективность возбуждения того или иного колебания определяется положением максимума интенсивности его поля по отношению к распространению центрального луча, исходящего из источника излучения. Очевидно, что наибольшая эффективность возбуждения будет наблюдаться в случае, когда центральный луч проходит через точку максимума интенсивности поля. За счет этого при изменении координаты источника φ_i наблюдается динамика изменений эффективности возбуждения колебаний, соответствующих одной моде исследуемого ДР.

Таким образом, в работе показано, что спектральные характеристики вынужденных колебаний типа ШГ эллиптического ДР и распределение их полей зависят от расположения источника излучения волн относительно геометрических осей резонатора и определяются параметрами резонатора и характеристиками источника излучения. Эффективность возбуждения колебаний в таком резонаторе зависит от выбора направления распространения образующих их волн ШГ и количественно определяется градиентом кривизны поверхности эллипсоида.

Список литературы

- [1] *Gastine M., Courtois L., Dormann I.L.* // IEEE Trans. 1967. V. MTT-15. N 12. P. 694–700.
- [2] *Харьковский С.Н., Козут А.Е.* // Сб. тр. 7-й Крымской конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“. Севастополь, 1997. Т. 2. С. 361–362.
- [3] *Козут А.Е., Кутузов В.В., Филиппов Ю.Ф., Харьковский С.Н.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1997. Т. 40. № 2. С. 19–26.
- [4] *Ильченко М.Е., Взятыйшев В.Ф., Гассанов Л.Г.* и др. Диэлектрические резонаторы / Под ред. М.Е. Ильченко. М.: Радио и связь, 1989. 328 с.
- [5] *Вайнштейн Л.А.* Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966. 475 с.
- [6] *Валитов Р.А., Дюбко С.Ф., Макаренко Б.И.* и др. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Методы и техника / Под ред. Р.А. Валитова, Б.И. Макаренко. М.: Радио и связь, 1984. 296 с.