

Таблица 1
Пространственное разрешение по азимуту в L_r

Длина синтезированной апертуры	Условия съемки				
	1	2а	2б	3а	3б
0,1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
0,2	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4
0,4	1,25	1,27	1,3	1,18	1,13
0,6	0,83	0,86	0,9	0,78	0,73
0,8	0,63	0,66	0,70	0,58	0,55
1,0	0,50	0,55	0,61	0,46	0,44
1,5	0,38	0,43	0,52	0,32	0,31
2,0	0,25	0,39	0,51	0,26	0,26
3,0	0,17	0,38	0,51	0,22	0,25
4,0	0,13	0,33	0,51	0,22	0,25

альной антенны в направлении движения антенны L_r , длина синтезированной апертуры выражена в единицах ширины ДН по уровню 0,5: $L_0 = 0,886 (\lambda/L_r)R$ для случая равномерного распределения электромагнитного поля по апертуре антенны. Отношение сигнал/шум приводится по отношению к величине сигнал/шум при длине синтезированной апертуры L_0 в случае классического режима съемки без переключения луча ДН.

Таблица 2
Отношение сигнал/шум

Длина синтезированной апертуры	Условия съемки				
	1	2а	2б	3а	3б
0,2	0,29	0,285	0,285	0,096	0,097
0,4	0,581	0,542	0,543	0,244	0,348
0,6	0,871	0,748	0,752	0,445	0,457
0,8	1,16	0,890	0,903	0,691	0,715
1,0	1,45	0,965	1,0	0,965	1,0
1,5	2,18	0,93	1,08	1,61	1,65
2,0	2,90	0,75	1,09	1,93	2,0
3,0	4,36	0,518	1,09	1,63	2,09
4,0	5,81	0,416	1,09	1,24	2,09

Из табл. 1 видно, что в режиме «классической» съемки, при $L = L_0$ пространственное разрешение при $D_{syn}(x) = D_{real}(x)$ равно не $0,5 L_r$, как обычно указывается в литературе исходя из (1), (2), а только $0,61 L_r$.

В ы в о д ы

Получены выражения для пространственного азимутального разрешения и отношения сигнал/шум для произвольного режима переключения луча ДН и её формы. Проведены вычисления для случаев классической съемки, съемки с однократным переключением луча ДН и «идеального» прожекторного режима. Рассмотрена ДН вида $(\sin x/x)^2$ и различные виды опорных функций.

Анализ результатов показывает, что применение режима съемки с однократным переключением луча ДН в ряде случаев является целесообразным. Так, при длине синтезированной апертуры $L_{syn} = 2 L_0$ выигрыш в пространственном разрешении и отношении сигнал/шум составляет 0,51/0,26 = 2,0 и 2,0/1,09 = 1,9 раза, соответственно, а проигрыш по сравнению с режимом «идеальной» прожекторной съемки лишь 0,26/0,25 = 1,04 и 2,9/2,0 = 1,45 раза. Проигрыш по энергетике является более существенным, чем по разрешению, но необходимо иметь в виду, что здесь не учтены неизбежные потери при организации многократного переключения луча ДН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave remote sensing//Addison-Wesley Publishing Company.— 1982.— Vol. 2.— P. 644 — 650.
2. Справочник по радиолокации/Под ред. М. Сколник.— Т. 2.— М.: Советское радио, 1977.— С. 337 — 362.
3. Карвер К. Р., Элаши Ш., Улаби Ф. Т. Дистанционное зондирование в СВЧ-диапазоне//ТИИЭР.— 1985.— Т. 73, № 6.— С. 30 — 56.

Статья поступила 15 августа 1991 г.

УДК 621.372.412/414 : 537.226

И. А. Соколов

ВЫСОКОДОБРОТНЫЙ ЭКРАНИРОВАННЫЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР С TE_{011} -ТИПОМ КОЛЕБАНИЙ

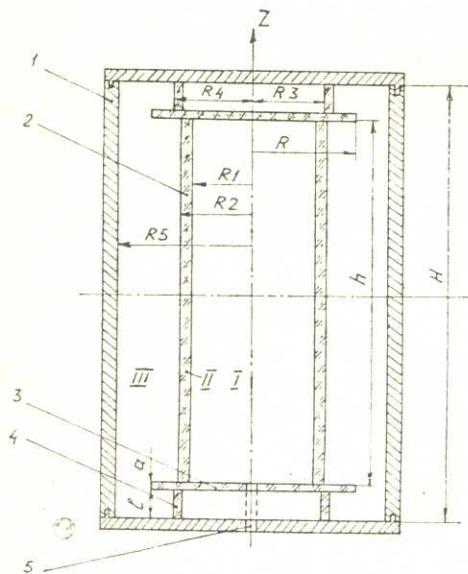
Предложена конструкция экранированного диэлектрического резонатора с TE_{011} -типом колебаний, позволяющая реализовать рекордно высокую собственную добротность порядка $120 \cdot 10^3$ на частоте $\sim 1,5$ ГГц. Обсуждаются электродинамическая модель, физические принципы действия и конструктивные особенности резонатора. Приведена упрощенная методика для быстрого расчёта геометрических размеров резонансной системы. Резонатор, рассчитанный на частоты 1...10 ГГц, может найти широкое применение в стандартах частоты и времени, а также в различных СВЧ-устройствах.

В последнее время наметилась перспектива широкого применения высокочастотных резонансных систем (ВДРС) на основе диэлектрических тел вращения в стандартах частоты (СЧ) и времени [1—5]. Внедрение ВДРС способствует, с одной стороны, существенному уменьшению массогабаритных параметров СЧ [1—3], а с другой,— обеспечению высоких спектральных и временных характеристик как непосредственно самих СЧ [1, 5, 6], так и СВЧ-источников синусоидальных колебаний, синтезированных на основе СЧ (квантовых дискриминаторов) и ВДРС [7, 8].

В настоящей статье обсуждается электродинамическая модель, анализируются конструктивные особенности, выводятся простые соотношения для расчета геометрических размеров высокочастотного лейкосапфирового резонатора в экране (ЭВДР),

работающего на низших типах колебаний $TE_{011}(H_{011})$. Следует отметить, что подобного рода ВДРС в настоящее время интенсивно внедряются в метрологическую аппаратуру [1—4, 9], и не исключено, что в недалеком будущем найдут применение в бортовой аппаратуре спутниковых навигационных и связных систем.

Чтобы понять основные преимущества рассматриваемого ЭВДР (рисунок), сравним их с известными конструкциями. В [9] описан диэлектрический объемный резонатор, состоящий из двух параллельных металлических дисков, между которыми нормально к их плоскости по центру помещена ди-



Конструкция ЭВДР:

1 — металлическая цилиндрическая камера (экран); 2 — лейкосапфировая трубка; 3 — лейкосапфировые крышки; 4 — лейкосапфировые кольца; 5 — отверстие связи

электрическая трубка, которая служит для создания необходимых условий резонанса и одновременно обеспечивает механическое крепление дисков. Резонансная частота определяется расстоянием между дисками, внутренними и внешними диаметрами трубки и диэлектрической проницаемостью материала трубки. Отмечается использование резонатора в схеме лазера. Резонатор имеет достаточно высокую добротность, но не максимально возможную, которую удастся реализовать в подобного рода конструкциях. Кроме того, резонатор обладает большими размерами даже на очень высоких частотах.

Известны резонаторы, частично заполненные диэлектриком [4], с типом волны H_{011} . Данные резонаторы представляют собой одно- или многослойные диэлектрические трубки в экране с металлическими или диэлектрическими крышками. Недостатком таких резонаторов являются большие потери (диэлектрические и радиационные), так как размеры диэлектрических вставок и металлических камер (экранов), в которых они расположены, выбраны из соображений минимизации только габаритов

резонаторов и не являются оптимальными с точки зрения наименьших потерь. Таким образом, собственная добротность резонаторов заведомо ухудшается неоптимальным выбором геометрических размеров.

Наиболее близким по технической сущности и по конструкции является малогабаритный резонатор, примененный в водородном генераторе [10], более полно рассмотренный в работах [1, 2]. Резонатор с рабочим типом колебаний H_{011} представляет собой металлическую цилиндрическую камеру, внутри которой размещена диэлектрическая трубка из лейкосапфира с торцевыми диэлектрическими крышками. Размеры такого резонатора, рассчитанного на частоту колебаний $f_0 = 1420$ МГц ($\lambda_0 \approx 21,13$ см):

$$H \approx 0,85 \lambda_0; R_1 \approx 0,19 \lambda_0; R_2 \approx 0,22 \lambda_0;$$

$$R_{\text{экр}} \approx 0,38 \lambda_0; h \approx 0,71 \lambda_0,$$

где R_1, R_2 — внутренний и внешний радиусы сапфировой трубки; $R_{\text{экр}}, H$ — радиус и высота металлической камеры; h — высота сапфировой трубки; λ_0 — длина волны в свободном пространстве. Собственная добротность имеет значение $\sim (50 \dots 55) \cdot 10^3$. Существенным в такой конструкции является то, что между торцами диэлектрических крышек и поверхностью камеры имеются воздушные зазоры, причем диаметры крышек и трубки совпадают. Кроме того, по сравнению с предыдущим случаем [4] расстояние между цилиндрическими поверхностями трубки и камеры значительно увеличено.

Конструкция [10] имеет два существенных недостатка. Основной недостаток состоит в том, что указанная конструкция не реализует максимально возможную добротность резонатора, хотя и ставит своей целью максимизацию именно этого параметра (важного, в частности, для водородного лазера). Предложенные авторами размеры и геометрия резонансной системы [1—3] не являются в этом смысле оптимальными, что, быть может, является следствием некорректного электродинамического расчета, так как авторы ссылаются на известные расчёты, где рассматривался резонатор в виде диэлектрической трубки, ограниченной с торцов проводящими дисками. В обсуждаемой же конструкции [10] крышки диэлектрические и, кроме того, между крышками и камерой имеется воздушный зазор.

Второй недостаток заключается в том, что конструкция [10] не является достаточно прочной механически и устойчивой к вибрациям и нагрузкам, а следовательно, применять такие резонаторы в транспортируемой аппаратуре с повышенными требованиями к механическим факторам воздействия (вибрациям, ударам, ускорениям и др.) технически трудно.

Принцип действия ЭВДР. Для пояснения принципа действия рассматриваемого ЭВДР (см. ри-

сунок) обратимся к классическому определению собственной добротности Q_0 резонансной системы:

$$Q_0 = 2\pi W / (PT),$$

где W — энергия, запасаемая в объеме резонатора; P — мощность, рассеиваемая за период колебаний T . В случае трёхслойного резонатора:

$$W = W_1 + W_2 + W_3, \quad P = P_T + P_d,$$

$$Q_0 = 2\pi(W_1 + W_2 + W_3) / [(P_T + P_d)T], \quad (1)$$

где W_1 и W_3 — энергия, запасаемая в I и III воздушных слоях (промежутках), соответственно; W_2 — энергия, запасаемая в II диэлектрическом слое; $P_d = \omega_0 W_2 \operatorname{tg} \delta$ — мощность потерь в диэлектрическом слое; ω_0 — угловая частота резонансной моды колебаний; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь сапфира; P_T — мощность, которая выделяется в виде тепловых потерь в металлических стенках экрана резонатора.

Для H₀₁₁-типа колебаний (выбор именно этого типа колебаний будет пояснен ниже) справедливы соотношения:

$$W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2} \int_V E_z^2 dV = W_1 + W_2 + W_3,$$

$$P_T = \frac{1}{4} \mu_0 \omega_0 \Delta \int_S H_z^2 dS, \quad P_{\text{мет}} = P_T,$$

где ε — диэлектрическая постоянная сапфира; E_z — электрическая составляющая поля H₀₁₁; $P_{\text{мет}}$ — тепловые потери в металлической поверхности S экрана ЭВДР; Δ — толщина скин-слоя на заданной частоте ω_0 ; H_z — тангенциальная составляющая поля ЭВДР по отношению к металлической поверхности S .

Анализируя выражение (1), можно сделать выводы, что для максимизации значения Q_0 необходимо:

увеличивать долю энергии W_2 в диэлектрике, при этом увеличиваются незначительно диэлектрические потери P_d ($\operatorname{tg} \delta$ для сапфира — малая величина), а потери на излучение (радиационные) снижаются;

увеличивать долю энергии в свободном пространстве (в слоях I и III), однако при этом возрастают радиационные потери и, следовательно, тепловые потери в металлических стенках экрана, диэлектрические потери уменьшаются.

Таким образом, для максимизации добротности необходимо выбирать геометрические размеры резонансной системы, оптимально перераспределяя накапливаемую энергию между слоями резонатора.

На низших модах колебаний при азимутальном номере $m = 0$ доля внешней энергии в свободном пространстве составляет значительную часть (с ростом m при переходе к высшим типам колебаний электромагнитная энергия всё в большей степени концентрируется в диэлектрике с одновременным уменьшением её доли в свободном пространстве). При m , равном 0, велики и радиационные потери, однако последние удаётся значительно снизить, если построить резонансную систему по принципу резонансного отражателя и применить отражатель-

ные диэлектрические вставки. Для этого необходимо подобрать такую слоистую структуру, которая для данного угла падения φ_0 (и данной частоты) обеспечивала бы коэффициент отражения, близкий по абсолютной величине единице, который бы при изменении угла падения быстро падал. Тогда колебание, у которого $\varphi = \varphi_0$, будет иметь малое затухание, а остальные колебания будут затухать быстро. Так реализуется избирательность и резонанс для выбранного типа колебаний на заданной частоте. Слоистая структура подбирается таким образом, чтобы отражение волн от всех границ слоёв происходило синфазно, т. е. чтобы при отражении все волны складывались арифметически. Так, для одного слоя диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε в этом случае необходимо выполнение соотношения [11, с. 241 — 242]

$$2k_n \varepsilon^{1/2} d = \pi, 3\pi, 5\pi \text{ и т. д.}, \quad (2)$$

где k_n — величина нормальной (к диэлектрическому слою) составляющей волнового вектора в свободном пространстве; d — толщина слоя.

При построении резонансной системы на основе резонансного отражателя для увеличения собственной добротности H₀₁₁-колебания предпочтительнее E₀₁₁-колебаний, так как, во-первых, коэффициент отражения от диэлектриков у H-волн больше, чем у E-волн при одних и тех же углах падения; во-вторых, волны H₀₁ возбуждают в стенках цилиндрического металлического экрана только круговые токи, поэтому тепловые потери наименьшие и, в-третьих, от металла H-волны и E-волны отражаются примерно одинаково хорошо, но E-волны проникают в глубь скин-слоя и незначительно затухают по сравнению с H-волнами. Таким образом, становится ясен выбор H₀₁₁-типа колебаний в качестве рабочего.

Оптимизацию конструкции проводили на основании строгих расчётов электродинамической модели ЭВДР численными методами на микрокомпьютере «Электроника МК-85» и микрокалькуляторе «Электроника МК-52» с блоком расширения памяти «Электроника БРП-3». В данном случае осуществляли оптимизацию геометрических размеров по выбранному критерию — максимуму добротности. Для этого многократно проводили анализ, причём на каждом этапе расчёта параметры (геометрические размеры) изменяли в соответствии с алгоритмом оптимизации. Таким образом, на каждом шаге оптимизации (в зависимости от полученных значений добротности на предыдущих этапах) оптимально перераспределяли запасаемую в ЭВДР энергию между слоями (например, при заданном радиусе экрана и внутреннем радиусе сапфировой трубки варьировали толщину стенки трубки). Оптимизация продолжалась до тех пор, пока на каком-то шаге добротность не достигала максимума, о чём можно было судить по снижению значений добротности на последующих шагах оптимизации. В результате оптимизации достигался эффект общего увеличения запасаемой энергии в резонаторе и суммарного сохранения или уменьшения потерь в случае применения дисковых диэлектрических резонаторов в качестве крышек.

Расчет ЭВДР. На рисунке изображена конструкция рассматриваемой резонансной системы. Приведём приближенные соотношения для расчёта геометрических размеров ЭВДР, пригодные для быстрой практической оценки геометрии ЭВДР.

Будем строить резонатор таким образом, чтобы максимум E_φ электрического поля находился в пределах диэлектрического слоя $(R_2 - R_1)$ сапфировой цилиндрической трубки 2. Тогда

$$dJ_1(x)/dx|_{x \approx g_1 R_2} = 0, \quad (3)$$

откуда $x = 1,841$ и $g_1 R_2 \approx 1,841$, где $J_1(x)$ — функция Бесселя первого порядка; $x = 1,841$ — первый максимум функции $J_1(x)$; g_1 — поперечное волновое число в диэлектрике; R_1, R_2 — внутренний и внешний радиусы сапфировой трубки, соответственно.

На стенках металлического цилиндрического экрана 1, при условии их бесконечной проводимости (считаем, что внутренняя поверхность экрана покрыта слоем серебра), тангенциальная составляющая электрического поля равна нулю. Применяя указанное граничное условие, получаем

$$E_\varphi|_{r=R_5} = 0, \text{ откуда } J_1(x)|_{x \approx g_1 R_5} = 0,$$

где $x = 3,832$ — первый нуль функции $J_1(x)$ и, следовательно,

$$g_1 R_5 \approx 3,832, \quad (4)$$

где R_5 — радиус металлического экрана. С учётом (3) и (4)

$$g_1 \approx 3,832/R_5 \approx 1,841/R_2. \quad (5)$$

Далее запишем следующие известные выражения:

$$g_1^2 + k_z^2 = \varepsilon k_0^2 \text{ — в диэлектрике,}$$

$$k_z^2 - g_2^2 = k_0^2 \text{ — в свободном пространстве,}$$

где k_z — продольное волновое число; g_2 — поперечное волновое число в свободном пространстве; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ — волновое число в свободном пространстве; λ_0 — резонансная длина волны в свободном пространстве. Из этих выражений легко получить связь между поперечными волновыми числами g_1 и g_2 , соответствующими различным средам:

$$g_1^2 + g_2^2 = k_0^2(\varepsilon - 1). \quad (6)$$

На основании выражения (2) применительно к толщине $(R_2 - R_1)$ стенки сапфировой трубки 2 и толщине (высоте) a сапфировых крышек 3 запишем:

$$2\varepsilon^{1/2}g_2(R_2 - R_1) = \pi, \quad (7)$$

$$2\varepsilon^{1/2}k_z a = \pi. \quad (8)$$

Далее рассчитываем сапфировые крышки 3, представляющие собой дисковые диэлектрические резонаторы (ДДР) с типом колебаний H_{011} , применяемые в качестве отражателей для снижения радиационных потерь. Чтобы ДДР не сдвигали требу-

емую резонансную частоту $f_0 = c/\lambda_0$, их необходимо рассчитывать на некоторую отличную от f_0 частоту

$$f_{\text{ДДР}} \approx f_0(1 + \kappa^2), \quad \kappa = A_1/A_2 \ll 1, \quad (9)$$

где

$$A_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2} \int_V E_\varphi^{\text{ДДР}} E_\varphi^{\text{ДДР}} dV;$$

$$A_2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2} \int_V E_\varphi^{\text{ДДР}} E_\varphi^{\text{II}} dV;$$

$E_\varphi^{\text{ДДР}}, E_\varphi^{\text{II}}$ — электрическая компонента поля в ДДР и в диэлектрической трубке, соответственно.

По частоте $f_{\text{ДДР}}$ и известному волновому продольному числу k_z рассчитываем радиус R ДДР, принимая во внимание то обстоятельство, что ДДР в данном случае является резонансным отражателем. Задача в этом случае сводится к нахождению радиуса R бесконечного диэлектрического волновода, например, по методике [11, с. 235—238]. Для этого необходимо решить систему уравнений:

$$K_1(\rho R)/[\rho R K_0(\rho R)] = -J_1(gR)/[gR J_0(gR)] \quad (10)$$

(для H_{01} -волны),

$$g^2 + k_z^2 = k_{\text{ДДР}}^2 \varepsilon, \quad (11)$$

$$\rho^2 + k_{\text{ДДР}}^2 = k_z^2, \quad k_{\text{ДДР}} = 2\pi f_{\text{ДДР}}/c, \quad (12)$$

где J_0, J_1 — функции Бесселя 0-го и 1-го порядков; K_0, K_1 — функции Макдональда 0-го и 1-го порядков; g, ρ — поперечные волновые числа для ДДР в диэлектрике и в свободном пространстве, соответственно.

Система уравнений (10), (11) и (12) решается на микрокомпьютере «Электроника МК-85». Сначала по известным значениям $k_{\text{ДДР}}$ и k_z из (11) и (12) находим волновые числа g и ρ . Затем, подставляя найденные значения g и ρ в (10), решаем уравнение (10), перебирая последовательно возможные значения R . Процесс вычислений заканчивается, когда уравнение (10) обращается в истинное равенство с требуемой точностью.

В заключение рассчитываем высоту h трубки, высоту H экрана и высоту l сапфировых колец 4. Сапфировые кольца 4 применяются для жёсткого крепления трубки 2 и ДДР 3 в объёме экрана 1, что в целом обеспечивает повышенную устойчивость конструкции ЭВДР к механическим факторам воздействия. При $k_0 R_5 \gg 1$ допустимо пренебречь кривизной цилиндрической стенки и отличием волны от плоской. Поэтому в первом приближении можно рассмотреть кубический металлический резонатор с типом волны H_{111} , у которого длина и ширина примерно совпадают с высотой $2 \cdot R_5 \approx H$. Проекция волнового вектора k_0 на оси

координат в этом случае равны между собой и составляют

$$k_x^* = k_y^* = k_z^* = k_0/\sqrt{3}. \quad (13)$$

Тогда из приближённых соотношений, вытекающих из граничных условий $k_z^* h + 2 a k_z^* \varepsilon^{1/2} \approx \pi$ и $H k_z^* \approx \pi$, находим:

$$H \approx \pi/k_z^*, \quad (14)$$

$$h \approx \pi/k_z^* - 2 a \varepsilon^{1/2} = H - 2 a \varepsilon^{1/2}, \quad (15)$$

$$l = (H - h - 2 a)/2. \quad (16)$$

Результаты вычислений

Для того чтобы сравнить ЭВДР с известными конструкциями [1, 2, 4, 9, 10], рассчитаем его на частоту $f_0 \approx 1420$ МГц. Примем для лейкосапфира $\varepsilon \approx 10$ и зададимся каким-либо геометрическим размером. Обычно известны R_1 или R_5 . Пусть задан радиус металлического экрана $R_5 = 9,5$ см. По формуле (5): $g_1 \approx 3,832/9,5 \approx 0,403$ и $R_2 \approx 4,57$ см. Из (6) находим

$$g_2 = \sqrt{k_0^2 (\varepsilon - 1) - g_1^2}; \quad k_0 = 2 \pi f_0 / c,$$

$$k_0 \approx 0,297 \text{ и } g_2 \approx 0,795.$$

По формуле (7)

$$R_1 = R_2 - \pi / (2 \varepsilon^{1/2} g_2), \quad R_1 \approx 3,95 \text{ см.}$$

Так как $k_z = (k_0^2 + g_2^2)^{1/2}$, то находим $k_z \approx 0,849$. Из (8) $a = \pi / (2 \varepsilon^{1/2} k_z)$, $a \approx 0,585$ см.

Рассчитываем ДДР. В одном из вариантов расчёта значение κ , равное A_1/A_2 , составило величину порядка $\sim 0,3$. По формуле (9) в этом случае находим $f_{\text{ДДР}} \approx 1550$ МГц.

Решение системы уравнений (10), (11), (12) при $f_{\text{ДДР}} = 1550$ МГц и $k_z = 0,848$ даёт следующие результаты:

$$g = 0,580; \quad \rho = 0,782; \quad R = 5,5 \text{ см.}$$

Далее последовательно по (13) — (16) находим: $k_z^* = 0,171$, $H = 18,37$ см, $h = 14,8$ см, $l = 1,2$ см.

Итак, для частоты $f_0 \approx 1420$ МГц ($\lambda_0 \approx 21,13$ см) получены следующие размеры ЭВДР:

$$R_1 = 0,19 \lambda_0, \quad a = 0,028 \lambda_0,$$

$$R_2 = 0,22 \lambda_0, \quad h = 0,7 \lambda_0,$$

$$R_5 = 0,45 \lambda_0, \quad H = 0,87 \lambda_0,$$

$$R = 0,26 \lambda_0, \quad l = 0,05 \lambda_0.$$

Внутренний и внешний радиусы R_3 и R_4 сапфировых колец выбираются из условий достаточной прочности, наименьшего влияния на частоту резонанса и внесения наименьших дополнительных потерь и примерно совпадают с внутренним и внешним радиусом сапфировой трубки. Толщина колец ($R_4 - R_3$) для большинства случаев составляет $\sim (0,03 \dots 0,04) \lambda_0$.

Чувствительность резонатора к изменениям геометрических размеров следующая:

$$\partial f_0 / \partial R_5 \approx 80 \text{ МГц/см,}$$

$$\partial f_0 / \partial (R_2 - R_1) \approx 976 \text{ МГц/см,}$$

$$\partial f_0 / \partial a \approx 5510 \text{ МГц/см,}$$

$$\partial f_0 / \partial h \approx 2,0 \text{ МГц/см,}$$

$$\partial f_0 / \partial R_1 \approx 96 \text{ МГц/см,}$$

$$\partial f_0 / \partial R \approx 720 \text{ МГц/см,}$$

$$\partial f_0 / \partial l \approx 14,5 \text{ МГц/см.}$$

В табл. 1 представлены результаты численных расчётов на ЭВМ электродинамической модели, соответствующей известным конструкциям [1, 2]. Для

Таблица 1

Результаты численных расчетов на ЭВМ [2] известных конструкций [1, 2] при $f_0 \approx 1420$ МГц; $\text{tg } \delta = 4 \cdot 10^{-6}$; $\varepsilon = 10,5$; $\Delta = 2,32$ мкм

h , см	R_1 , см	ω , см	$R_{\text{экp}}$, см	$Q_p \cdot 10^3$
14,0 *	4,5	0,45	11,7	63,3
14,0 *	4,5	0,5	10,5	61,9
14,0 *	4,5	0,55	9,7	58,2
14,0 *	4,5	0,6	9,0	53,3
14,0 *	4,5	0,65	8,5	48,1
14,0 *	4,5	0,7	8,1	43,2
14,0 *	4,5	0,75	7,8	38,8
14,0 *	4,5	0,8	7,6	34,9
14,0 *	4,5	0,85	7,4	31,6
14,0 *	4,5	1,0	7,0	24,2
14,0 *	4,5	2,0	6,5	11,2
14,0 **	4,5	0,7	8,0	46,0
15,0 ***	4,1	0,65	8,0	50,0

Примечания: * — сапфировая трубка с торцов ограничена металлическими дисками (крышками); ** — применены кварцевые крышки с толщиной 2,5 мм; *** — данные соответствуют конструкции при толщине сапфировых крышек 1,5 см и высоте экрана $H = 18,0$ см (при отсутствии воздушного зазора между торцами крышек и экраном); $\omega = (R_2 - R_1)$ — толщина стенки трубки; R_1, R_2 — внутренний и внешний радиусы трубки, соответственно; $R_{\text{экp}}$ — радиус экрана.

сравнения в табл. 2, где представлены результаты численных расчётов обсуждаемого ЭВДР, приведены значения добротности Q_p резонатора без

Таблица 2

Результаты численных расчетов на ЭВМ конструкции ЭВДР (см. рисунок) при $f_0 = 1420$ МГц, $\text{tg } \delta = 1 \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon = 10$

h , см	R_1 , см	ω , см	$R_{\text{экp}}$, см	$Q_p \cdot 10^3$	$Q_0 \cdot 10^3$
15,0	3,0	0,75	9,3	83,0	124,0
14,0	5,0	0,5	12,9	64,4	122,9
15,0	2,6	0,85	9,1	55,3	107,0
15,0	2,8	0,8	9,3	54,1	104,2
15,0	4,0	0,5	11,5	49,2	104,0
15,0	4,0	0,75	9,3	53,0	102,0
15,0	4,0	0,6	9,5	47,9	90,8
15,0	4,0	0,65	8,9	45,8	80,0
15,0	5,0	0,5	10,1	43,9	79,1
15,0	5,0	0,55	9,5	42,3	73,3
15,0	4,0	0,75	7,9	41,4	64,1
15,0	3,0	1,0	6,5	41,1	51,6
15,0	5,0	1,0	7,5	24,8	30,9
20,0	5,0	1,0	7,3	23,7	27,4
15,0	4,0	2,0	6,1	14,5	16,2

Примечание. Δ — соответствует толщине скин-слоя серебра на частоте f_0 . Обозначения параметров приняты те же, что и для табл. 1.

ДДР и без колец (с торцевыми металлическими крышками) и значения добротности Q_0 всей резонансной системы в том виде, как она изображена на рисунке.

Тангенс угла диэлектрических потерь для лейкосапфира по различным источникам литературы составляет $10^{-5} \dots 10^{-6}$ при температуре $T = 300$ К. Несмотря на то, что при расчёте известных конструкций брались лучшие значения ($\operatorname{tg} \delta \cong 4 \cdot 10^{-6}$), а при расчёте обсуждаемого ЭВДР — худшие ($\operatorname{tg} \delta \cong 1 \cdot 10^{-5}$), значения Q_0 , как видно из сопоставления табл. 1 и 2, получились примерно одинаковыми, а собственная добротность Q_0 ЭВДР примерно в 1,5 . . . 2 раза превышает зна-

$$\begin{aligned} 1. \quad R_1 &= 3 \text{ см} = 0,14 \lambda_0, & H &= 17,55 \text{ см} = 0,83 \lambda_0, \\ R_2 &= 3,75 \text{ см} = 0,18 \lambda_0, & h &= 14,45 \text{ см} = 0,68 \lambda_0, \\ R_3 &= 3 \text{ см} = 0,14 \lambda_0, & R &= 7,3 \text{ см} = 0,35 \lambda_0, \\ R_4 &= 3,8 \text{ см} = 0,18 \lambda_0, & a &= 0,55 \text{ см} = 0,026 \lambda_0, \\ R_5 &= 9,3 \text{ см} = 0,44 \lambda_0, & l &= 1 \text{ см} = 0,05 \lambda_0, \end{aligned}$$

$$Q_0 \cong 120 \cdot 10^3;$$

$$\begin{aligned} 2. \quad R_1 &= 4 \text{ см} = 0,19 \lambda_0, & H &= 17,91 \text{ см} = 0,85 \lambda_0, \\ R_2 &= 4,6 \text{ см} = 0,22 \lambda_0, & h &= 15 \text{ см} = 0,71 \lambda_0, \\ R_3 &= 3,5 \text{ см} = 0,17 \lambda_0, & R &= 5,5 \text{ см} = 0,26 \lambda_0, \\ R_4 &= 4,3 \text{ см} = 0,20 \lambda_0, & a &= 0,55 \text{ см} = 0,026 \lambda_0, \\ R_5 &= 9,5 \text{ см} = 0,45 \lambda_0, & l &= 0,9 \text{ см} = 0,042 \lambda_0, \end{aligned}$$

$$Q_0 \cong 90 \cdot 10^3.$$

Первый вариант имеет преимущество наивысшей добротности, однако внутренний объем сапфировой трубки недостаточен для некоторых практических применений, например, в водородных лазерах. Кроме того, большой диаметр $2R$ отражательных дисков ДДР делает конструкцию в целом недостаточно прочной. Напротив, второй вариант, обладая относительно меньшей добротностью, отличается высокой прочностью и надёжностью и может найти широкое применение вследствие достаточного внутреннего объема трубки. Таким образом, размеры ЭВДР из лейкосапфира ($\epsilon \cong 10$) выбираем из диапазона значений с учётом экспериментальной подгонки на номинальную частоту $f_0(\lambda_0)$:

$$\begin{aligned} R_1 &= (0,14 \dots 0,20) \lambda_0, & R_5 &= (0,42 \dots 0,45) \lambda_0, \\ R_2 &= (0,18 \dots 0,23) \lambda_0, & H &= (0,83 \dots 0,88) \lambda_0, \\ R_3 &= (0,14 \dots 0,20) \lambda_0, & l &= (0,03 \dots 0,05) \lambda_0, \\ R_4 &= (0,18 \dots 0,24) \lambda_0, & h &= (0,68 \dots 0,71) \lambda_0. \end{aligned}$$

При этом размеры сапфировых крышек ДДР составляют:

$$R = (0,25 \dots 0,35) \lambda_0, \quad a = (0,02 \dots 0,03) \lambda_0.$$

Возбуждение резонатора можно осуществлять через отверстие связи b , расположенное по центру резонатора с торца, где компонента магнитного поля H_z максимальна. Такое возбуждение удобно, в частности, когда ЭВДР применяется в квантовых СЧ.

чения добротностей, реализуемые известными конструкциями.

Размеры ЭВДР, рассчитываемого на заданную частоту f_0 , следует выбирать из определенного интервала значений, обусловленного следующими причинами: практическим применением резонатора; необходимой прочностью и жёсткостью конструкции; разбросом значений ϵ , составляющих для лейкосапфира 9,4 . . . 11,6; точностью численных расчетов.

Так, например, расчёты на частоту $f_0 \cong 1420$ МГц дают два возможных ряда значений геометрических размеров (см. табл. 2):

В заключение укажем, что ЭВДР (см. рисунок) можно с успехом применять и на более высоких частотах, например в рубидиевом квантовом дискриминаторе ($f_0 \cong 6840$ МГц). Кроме того, СВЧ-генераторы, стабилизированные подобным ЭВДР, будут обладать уникальными спектральными и временными характеристиками.

Расчеты показывают, что для транзисторного автогенератора (АГ) при нагруженной добротности резонатора $Q_H \cong 10^5$ на центральной частоте $f_0 = 1500$ МГц спектральная плотность мощности фазовых флуктуаций $S_\varphi(F)$ составляет значения, представленные в табл. 3, в полосе анализа $\Delta F = 1$ Гц.

Таблица 3
Фазовые шумы АГ на ЭВДР

F , Гц	$S_\varphi(F)$, дБ/Гц (АГ, перестраиваемый по частоте напряжением)	$S_\varphi(F)$, дБ/Гц (АГ с фиксированной частотой)
100	-92,5	-112,1
500	-113,4	-131,7
1 000	-122,4	-139,4
5 000	-141,7	-154,1
10 000	-147,6	-157,6
50 000	-155,1	-159,8

По рассмотренной в статье конструкции ЭВДР была подана заявка на изобретение, по которой получено положительное решение [12].

Выводы

Предложена усовершенствованная конструкция экранированного диэлектрического резонатора, обладающего высокой добротностью $\sim 10^5$ на частоте $f_0 \sim 1500$ МГц, с H_{011} -типом колебаний.

Резонатор отличается от известных конструкций тем, что с целью увеличения добротности и повышения устойчивости конструкции к механическим факторам воздействия, крышки закреплены с торцевыми поверхностями камеры при помощи расположенных симметрично продольной оси резонатора лейкосапфировых колец. Сами крышки представляют собой дисковые диэлектрические резонаторы с размерами: $R = (0,25 \dots 0,35)\lambda_0$; $a = (0,02 \dots 0,03)\lambda_0$; при этом диэлектрическая трубка, кольца и металлическая камера имеют следующие размеры: $R_1 = (0,14 \dots 0,20)\lambda_0$; $R_2 = (0,18 \dots 0,23)\lambda_0$; $R_3 = (0,14 \dots 0,20)\lambda_0$; $R_4 = (0,18 \dots 0,24)\lambda_0$; $R_5 = (0,42 \dots 0,45)\lambda_0$; $h = (0,68 \dots 0,71)\lambda_0$; $l = (0,03 \dots 0,05)\lambda_0$; $H = (0,83 \dots 0,88)\lambda_0$.

Резонатор может найти широкое применение в стандартах частоты и времени, в СВЧ-источниках синусоидальных колебаний с высокими спектральными и временными характеристиками, а также в СВЧ-фильтрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перевозимые квантовые часы на основе водородного генератора с малогабаритным резонатором/Б. А. Гайгеров, Ф. С. Русин, Н. И. Польников и др.//Измерительная техника.— 1989.— № 4.— С. 17—18.
2. Гайгеров Б. А. Водородный генератор с малогабаритным резонатором//Измерительная техника.— 1986.— № 6.— С. 8—9.
3. Эталонная база государственной службы времени и частоты СССР: состояние и направления развития/С. Б. Пушкин, Ю. Г. Абашев, А. П. Альшина и др.//Сборник научных трудов ВНИИФТРИ.— М., 1990.— С. 14—15.
4. Отчет по НИР «Квант-83» Разработка транспортируемых квантовых часов на основе водородного спектрокопа.— Иркутск: ВНИИЦ, 1987.
5. Волков П. В. Стандарты частоты на основе охлажденных дисковых диэлектрических резонаторов//Электронная техника. Сер. 10, Микроэлектронные устройства.— 1989.— Вып. 3(75)— С. 6—8.
6. Гайгеров Б. А., Сысоев В. П., Польников Н. И. Исследование транспортируемого водородного стандарта частоты//Сборник научных трудов ВНИИФТРИ.— М., 1990.— С. 18—27.
7. Синтезатор СВЧ с узкой спектральной линией для исследования квантовых переходов в ионах Ba^{+137} /С. Н. Буньков, В. И. Константинов, А. Д. Токарев, Ю. В. Усов//Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по исследованиям в области измерений времени и частоты.— М.: ВНИИФТРИ и ФИАН, 1990.— С. 48—49.
8. СВЧ-генератор с диэлектрическим резонатором, стабилизированный квантовым дискриминатором/А. К. Вершовский, А. С. Пазгалев, Н. Н. Якобсон и др.//Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по исследованиям в области измерений времени и частоты.— М.: ВНИИФТРИ и ФИАН, 1990.— С. 84—86.
9. Пат. 3448379 США, МКИ³ G 01 324—58. Dielectric cavity resonator/F. J. Rosenbaum.
10. А. с. 1238184 СССР, МКИ HO1S1/06. Водородный генератор/Б. А. Гайгеров, С. Б. Пушкин, Ф. С. Русин.— Оpubл. 1986, Бюл. № 22.
11. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны.— М.: Радио и связь, 1988.— 440 с.
12. Заявка № 4902284/25 СССР, МКИ⁵ HO1S1/06, HO1P7/10. СВЧ-резонатор/И. А. Соколов.— Приоритет от 14.01.1991 г., положительное решение от 22.11.1991 г.

Статья поступила 19 сентября 1991 г.

А. Т. Мингазин, А. А. Зорич

МИНИМИЗАЦИЯ ШУМА ОКРУГЛЕНИЯ КАСКАДНЫХ РЕКУРСИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Рассмотрена задача минимизации шума округления каскадных рекурсивных цифровых фильтров, оперирующих с числами в форме с фиксированной запятой. Предложен алгоритм ее решения путем формирования полюсно-нулевых пар и упорядочения звеньев передаточной функции, отличающийся от известных схемами генерирования упорядочений. Проиллюстрирована эффективность нового алгоритма применительно к различным типам фильтров, видам аппроксимации, вариантам масштабирования и реализации звеньев.

Преимущества реализации рекурсивных цифровых фильтров на основе каскадных структур хорошо известны. Однако в таких структурах шум, обусловленный округлением результатов арифметических действий, может сильно зависеть от группировки полюсно-нулевых пар передаточных функций отдельных звеньев, а также от последовательности включения звеньев. В связи с этим возникает проблема минимизации шума. Поскольку для фильтров средних и высоких порядков полный перебор возможных вариантов не пригоден из-за очень большого времени вычисления на ЭВМ, то был предложен целый ряд методов получения «хороших» решений за приемлемое время [1—12]. В основу этих методов положены эвристические правила [1, 9, 12] или процедуры оптимизации [5, 7, 11], приводящие к субоптимальным решениям, или алгоритмы динамического программирования [4, 6, 10], позволяющие получить точные решения. Хотя применение динамического программирования дает значительное сокращение времени вычисления по сравнению с полным перебором, тем не менее это время в случае передаточных функций порядка $N \geq 10$ оказывается существенным. Кроме того, при этом требуется большой объем памяти для хранения промежуточных результатов. По этим и другим причинам разработчики и исследователи часто отдают предпочтение эвристическим методам.

В данной работе предлагается еще один эвристический алгоритм, который по сравнению с существующими позволяет получить лучшие решения или значительно сократить количество вычислений без заметного ухудшения результатов.

Оценка шума округления каскадных цифровых фильтров

Введем следующие допущения:

- фильтр оперирует с двоичными числами, представленными в форме с фиксированной запятой;
- округление чисел осуществляется в каждом суммирующем узле каскадной структуры после последнего этапа суммирования;
- квантование сигнала на входе и выходе фильтра не учитывается;
- справедлива вероятностная модель округления чисел (см., например [12]);