

УДК 533.9.082.74; 520.647; 520.6.05
EDN: SCJXRД

PACS: 94.80. +g



Оценка чувствительности датчика плотности плазмы при воздействии тепловых потоков солнечно-синхронной орбиты на конструкцию зондов

С. В. Цаплин, И. В. Белоконов, С. А. Большев

Проведён расчёт и сделан анализ влияния термомеханического состояния конструктивных элементов датчика плотности плазмы (ДПП) на динамику изменения параметров резонатора при воздействии тепловых потоков круговой солнечно-синхронной орбиты (ССО) в условиях длительной эксплуатации. Из результатов анализа следует, что по квазипериодическому закону (КПЗ) синхронно во времени при движении наноспутника на орбите изменяются температурное поле; относительные смещения конструктивных элементов зондов ДПП в поперечном и продольном направлениях в результате термоупругих деформаций. По результатам расчета деформаций в модельном приближении двухпроводной линии была определена относительная чувствительность ($1,198 \times 10^{-3} - 2,115 \times 10^{-3}$) резонатора, которая пропорциональна сдвигу резонансной частоты. Установлено на основе расчёта, что сдвиг резонансной частоты аналогично изменяется по КПЗ как в сторону меньших $-311,93$ кГц, так и больших частот $550,597$ кГц относительно резонансной частоты при отсутствии воздействия тепловых потоков за время пяти витков обращения наноспутника вокруг Земли. В этом диапазоне частот вычислялись значения диэлектрической проницаемости, плотности электронной плазмы. Исследована возможность измерения электронной плотности плазмы в моменты времени, когда резонансный сдвиг равен нулю. Определена допустимая пятипроцентная область электронной плотности плазмы, в которой резонансный сдвиг незначительно влияет на возможность точного измерения плотности плазмы. В другие моменты времени сдвиг резонансной частоты приводит к изменению диэлектрической проницаемости плазмы, и в результате точность измерений плотности плазмы будет снижаться. Относительная чувствительность ДПП является важной характеристикой для получения достоверных результатов измерений плотности плазмы при необходимой относительной чувствительности датчика должна составлять $\sim (10^{-4} - 10^{-5})$.

Ключевые слова: резонанс, датчик плотности плазмы, резонансный СВЧ-зонд, сдвиг резонансной частоты, относительная чувствительность, резонатор, градиент температуры, термоупругие деформации, неоднородная ионосфера, плазменная частота, плотность электронов.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-115-127

Цаплин Сергей Васильевич, зав. лаб., к.ф.-м.н.
E-mail: tsaplin56@yandex.ru
Белоконов Игорь Витальевич, зав. кафедрой, д.т.н.
Большев Станислав Александрович, м.н.с.
Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева.

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Статья поступила в редакцию 24.10.2022

После доработки 17.01.2023

Принята к публикации 13.02.2023

© Цаплин С. В., Белоконов И. В., Большев С. А., 2023

Введение

Изучение нестационарной и неоднородной структуры высокоширотной ионосферы является важной фундаментальной задачей физики космической плазмы, поскольку тесно связано с прохождением радиосигналов через ионосферу. Оно требуется для обеспечения корректного использования спутниковых навигационных систем, обеспечения устойчивой связи и определения местоположения в заданный момент времени [1–3].

Размещение датчика плотности плазмы (ДПП) планируется на наноспутнике SamSat-ION формата CubeSat 3U [4] для подготовки и проведения экспериментальных исследований высокоширотной нестационарной и неоднородной ионосферы. В основу методики измерения плотности ионосферы с помощью ДПП будет использовано резонансное явление, позволяющее измерять диэлектрическую проницаемость плазмы, величина которой определяется электронной плотностью [5, 6]. Известно, что температурное поле в условиях эксплуатации приборов различного назначения, находящихся на внешней стороне спутников, будет изменяться из-за воздействия тепловых потоков на разные участки поверхности космического аппарата [7]. Указанные изменения непосредственно связаны с воздействием потоков прямого солнечного излучения, отражённого солнечного излучения от поверхности Земли, собственного излучения Земли, отражённого излучения от атмосферы Земли, а также «выхолаживающего» эффекта межпланетного космического пространства на конструкцию зондов резонатора ДПП. При периодической смене наноспутником SamSat-ION местоположения относительно терминатора Земли меняются и плотности тепловых потоков, поскольку, как будет показано ниже, плотность потоков изменяется в зависимости от ориентации и местоположения спутника над поверхностью Земли. В результате периодической смены условий теплового облучения наноспутника с периодом, кратным продолжительности одного витка, а также

инерционности процессов теплопередачи, в резонаторе образуются значительные градиенты температур, приводящие к деформациям (смещению) различных участков резонатора и, как следствие, к изменению резонансной частоты. Резонансный сдвиг, на котором основана методика определения электронной плотности [5] будет содержать изменение резонансной частоты, которая обусловлена динамикой изменений температуры резонатора. В результате суммарная относительная чувствительность ДПП может привести к сдвигу резонансной частоты в измерении электронной плотности [5].

Известно, что изменения траектории движения наноспутника на орбите будут сопровождаться изменениями углов тангажа, рыскания и крена. В этом случае из-за неравномерности и нестационарности тепловых потоков, исходящих от Солнца и Земли, воздействующих на поверхность зондов, возникнут поперечные и продольные градиенты температур у зондов резонатора ДПП [6, 7]. На основании предположения о влиянии температурных градиентов на конструктивные элементы ДПП, находящиеся на внешней стороне наноспутника SamSat-ION, на основе физико-математического моделирования выполнено исследование с целью оценки сдвига резонансной частоты во время измерений электронной плотности ионосферной плазмы круговой ССО 550 км при воздействии тепловых потоков, исходящих от Солнца и Земли.

Оценка и анализ параметров ионосферной плазмы

Активная часть ДПП (СВЧ-зонд) располагается снаружи наноспутника SamSat-ION, поскольку для измерений плотности ионосферы требуется контакт СВЧ-зонда с окружающей средой — ионосферной магнитоактивной плазмой. Усреднённые параметры ионосферной плазмы определены в соответствии с данными Европейского Космического Агентства, результаты приведены в (табл. 1).

Таблица 1*

Параметры ионосферной плазмы [8, 9]

Высота, км	$n_e \times 10^{-5}$, см ⁻³	$n_0 \times 10^{-7}$, см ⁻³	ν_{en} , с ⁻¹	$\omega_{pe} \times 10^{-7}$, с ⁻¹	B_{Ear} , Гс	$\omega_{He} \times 10^{-6}$, с ⁻¹
400	7	10 ²	4,151	4,769	0,546	9,608
500	6	40	1,728	4,415	0,521	9,162
550	4,6	25	1,09	3,826	0,519	9,128
600	3	10	0,44	3,122	0,497	8,375
700	2	2,89	0,137	2,549	0,473	8,319

* n_e – плотность электронов, n_0 – плотность нейтральных частиц, ν_{en} – частота столкновений электронов с нейтральными частицами газа, ω_{pe} – плазменная частота электронов, $H_{Ear} = B_{Ear}$ – напряжённость магнитного поля Земли, ω_{He} – легмиуровская (циклотронная) частота электронов.

Для исследования плазмы в объемах малых размеров с относительно малой плотностью применяются резонаторные и волноводные методы [5]. Диапазон измеряемых плотностей неоднородной ионосферной плазмы электронов n_e составляет $7 \times 10^5 - 3 \times 10^5$ см⁻³ (плотность нейтральных частиц $n_0 = 1 \times 10^9 - 1 \times 10^8$ см⁻³), что характерно для ионосферной плазмы на высотах 400–600 км, соответственно. Исследуемая плазма ограничена поперечными размерами резонатора или волновода l_{ion} , которые обычно не превышают длины волны λ зондирующих колебаний [5]: $l_{ion} < \lambda = 2\pi c / \omega_z$, где $c = 2,997 \times 10^{10}$ см/с – скорость света в вакууме, $\omega_z = 6,283 \times 10^9$ Гц – частота зондирующего поля. Поскольку длина волны λ для частоты зондирующего излучения ω_z равна 29,979 см. Для выполнения неравенства и исходя из конструктивных соображений ДПП, было принято $l_{ion} = 1,9$ см. Измерения абсолютной плотности электронов ионосферной плазмы использована методика измерения диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы $\epsilon(\omega)$ [2, 5].

Определим размеры области исследуемой плазмы. Для этого определим измерительную часть ДПП из условия её размещения на наноспутнике. Архитектура измерительной части ДПП, окруженная плазмой, представляет собой распределенную резонансную систему в виде четвертьволнового отрезка двухпроводной линии, закороченного на одном конце и разомкнутого на другом, обладает свойствами резонатора с собственной частотой [2] $\omega_{res} = \pi c / (2l_{tr} \epsilon_p^{1/2})$, где l_{tr} – длина зонда, c – скорость света. Из этой формулы следует, что для оценки длины зонда l_{tr} необходимо опре-

делить ϵ_p . Известно [5], что резонаторные методы основаны на измерении характеристик резонатора, заполненного плазмой. При поступлении плазмы в резонатор, происходит изменение резонансной частоты и добротности. Измеряя сдвиг резонансной частоты и изменение добротности резонатора, можно определить активную и реактивную составляющие проводимости плазмы и, связанные с этими составляющими, плотность и частоту столкновений электронов плазмы [5]. Поскольку частота зондирующего поля ω_z много больше частоты столкновений ν_{en} (по данным табл. 1), то значение активной составляющей диэлектрической проницаемости много больше реактивной составляющей плазмы. Тогда в приближении оптики вдали от линии резонансного поглощения для магнитоактивной невырожденной электронной плазмы запишем диэлектрическую проницаемость в соответствии с [10] в виде: $\epsilon_p(\omega_z) = n^2(\omega_z) = 1 - \omega_{pe}^2 / \omega_z^2$. Определим длину зондов ДПП по формуле $l_{tr} = (\pi \cdot c / 2\omega_{res}) / [\epsilon_p(\omega_{res})]^{1/2}$.

С другой стороны, исходя из массогабаритной возможности наноспутника допустимой величиной может быть длина зондов $l_{tr} \leq 30$ см. Численно оценим для резонансной частоты $\omega_{res} = 1,635 \times 10^9$ Гц значения: $\epsilon_p = 0,999453$, $n_p = 0,99973$, а также длину зондов l_{tr} ДПП. В результате, с учётом допустимого возможного массогабаритного размера зондов получим длину двухпроводной линии $l_{tr} = 28,799$ см $\approx 28,8$ см. Для частоты зондирующего излучения определим коэффициенты отражения, пропускания и поглощения: $R = 1,875 \times 10^{-8}$, $T = 1$, $A = 0$. Следовательно, поглощение и от-

ражение (несущественно) отсутствует, электромагнитная волна полностью проходит через плазму. Таким образом, при $\omega \gg \omega_{pe}$ диэлектрическая проницаемость ϵ_p положительная величина, а коэффициент пропускания равен единице. Электромагнитная волна зондирующего излучения в этом случае проникает на глубину порядка длины волны $\lambda_z = 115,198$ см. Оценим влияния магнитного поля на параметры ионосферной плазмы на ССО 550 км. Поскольку $\omega_{pe} = 3,826 \times 10^7$ Гц, $\omega_{He} = 9,128 \times 10^6$ Гц (см. табл. 1) и они отличаются в четыре раза, т. е. одного порядка, то для магнитоактивной ионосферной плазмы на ССО высотой 550 км будет справедливо соотношение $\omega \gg (\omega_{pe}, \omega_{He})$. Такая плазма не является замагниченной.

Определим численное значение плотности электронов плазмы n_{ep} при которой влияние на распространение зондирующей электромагнитной волны незначительно ($\epsilon \approx 1$). В соответствии с условиями: $v_{en} \ll \omega$ (см. табл. 1), $n_e < n_c$, где n_c – «критическая» плотность плазмы справедлива формула для диэлектрической проницаемости плазмы $\epsilon_p = 1 - \omega_{pe}^2 / \omega^2 = 1 - n_e / n_c$ ((1.21) в [5]) запишем условие при котором влияние плазмы на распространение зондирующей волны будет незначительным, т. е. $n_e \ll n_c = m\omega_z^2 / (4\pi e^2) = 1,24 \times 10^{10}$ см⁻³, где m – масса электрона. Численное значение n_c совпадает с результатами,

представленными в [5, на стр. 19 (рис. 4)]. Оценим условие применимости резонаторной методики измерений по формуле $n_e < \pi m c^2 / (l_{ion}^2 e^2) = 3,0882 \times 10^{12}$ см⁻³. В основе методики определения плотности ионосферной плазмы используется методика, изложенная в [2, 6] в которой измерительная часть ДПП наноспутника SamSat-ION представляет собой резонансную систему в виде четвертьволнового отрезка двухпроводной линии, разомкнутой с двух сторон сосредоточенным колебательным контуром с емкостью и индуктивностью [2, 11, 12]. В предлагаемой схеме измерений чувствительные элементы ДПП используются в условиях, когда собственная частота резонатора $\omega_{res} = 1,635 \times 10^9$ Гц с плазмой значительно превышает плазменную частоту $\omega_{pe} = 3,826 \times 10^7$ Гц. В этом случае моды плазменных колебаний, которые могут возбуждаться в ионосферной плазме, подавляются затуханием Ландау и поэтому не влияют на результаты измерений [11]. Для определения влияния тепловых потоков Солнца и Земли на термомеханическое состояние конструкции датчика использовалась 3D-модель двухпроводной линии. Двухпроводная линия состоит из двух медных трубок (зондов) диаметром 6 мм, с толщиной стенок $h = 1$ мм, длиной $l_{tr} = 288$ мм в развернутом виде на орбите и с расстоянием между трубками $l_{ion} = 19$ мм (рис. 1).

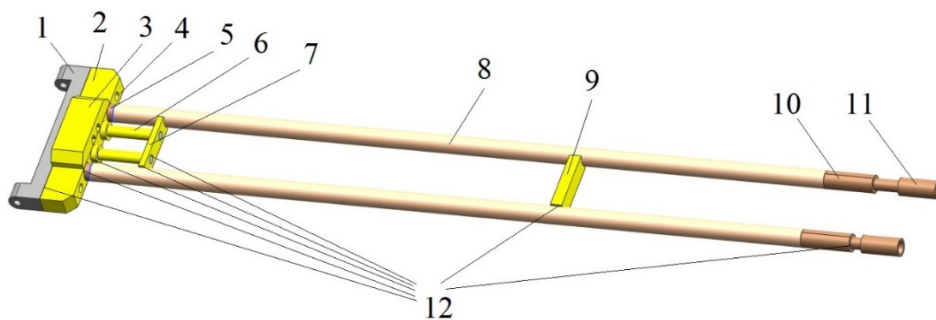


Рис. 1. Расчётная модель конструктивных элементов резонатора ДПП: 1 – вилка, 2 – пластина, 3 – прижимная пластина, 4 – штифт, 5 – гтулка, 6 – вал, 7 – планка, 8 – трубка, 9 – перемычка (полиамид), 10 – наконечник регулировочный, 11 – наконечник, 12 – слой клея

Постановка задачи

Задача определения температурного поля трехмерной модели ДПП, показанной на (рис. 1), описывается системой уравнений теплопроводности для каждого элемента ДПП с граничными условиями второго рода – нестационарные тепловые потоки (прямой солнечный, отраженный от Земли солнечный потоки, собственный поток от Земли и космического пространства), падающие на внешние поверхности элементов ДПП, а также тепловые потоки, обусловленные собственным тепловым излучением элементов ДПП, с учетом взаимного переоблучения. Тепловые потоки вычислялись в соответствии с методикой, изложенной в [7]. В качестве начального условия принята температура $T_0 = 293$ К для всех конструктивных элементов модели ДПП.

Задача определения температурно-напряженного состояния элементов ДПП описывается системой уравнений нестационарной термоупругости для каждого элемента трехмерной модели ДПП, приведенной на (рис. 1), с нелинейными краевыми условиями [7], задаваемыми в соответствии с условиями эксплуатации наноспутника SamSat-ION на высотах слоя ионосферы, через который проходит орбита наноспутника.

Решение задачи термоупругости позволяет в дальнейшем провести оценку смещения резонансной частоты ДПП, исходя из того, что собственная резонансная частота зонда ДПП имеет порядок 1 ГГц, а добротность резонанса $Q \sim 100$. Согласно плану исследований ионосферы с помощью наноспутника SamSat-ION определение плотности неоднородной ионосферной плазмы планируется проводить на резонансной частоте зонда $f_{res} = \omega_{res}/2\pi$ с помощью ДПП, расположенного на внешней стороне наноспутника SamSat-ION и обращенного к поверхности Земли.

Оценка сдвига резонансной частоты

Неравномерность воздействия тепловых потоков на конструкцию ДПП приводит к образованию температурных градиентов внутри стенок зондов резонатора и, как следствие, к возникновению деформаций и смещений конструктивных элементов. Деформации приво-

дят к изменению объемов трубок зондов резонатора. Опуская особенности постановки и решения задачи термоупругости численными методами, оценим в приближении двухпроводной линии изменения ёмкости резонатора и сдвиг резонансной частоты. Тепловое расширение меди при изменении температуры на величину $dT = 60$ °C приведет к изменению длины медных трубок на величину $dl_{tr} = \alpha l_{tr} dT$, где $\alpha = 16,7 \times 10^{-6}$ K⁻¹ – коэффициент линейного теплового расширения меди, l_{tr} – длина трубок зондов резонатора. Определим: $\alpha \Delta T = 1,002 \times 10^{-3}$, $\Delta l_{tr} = 2,88576 \times 10^{-4}$ м, $\Delta R = 3,006 \times 10^{-6}$ м, ёмкость двухпроводной линии без плазмы $C = 3,8048$ пкф и с плазмой $C_p = 3,8084$ пкф с учётом $\epsilon_p = 0,999453$, а также индуктивность $L_0 = 9,8198 \times 10^{-8}$ Гн для резонансной частоты $f_{res} = 2,6038 \times 10^8$ Гц. Вычислим: $\Delta C/C = 9,4617 \times 10^{-4}$, $f_{resp} = 2,6025 \times 10^8$ Гц – резонансная частота с плазмой. Определим сдвиг резонансной (изменение резонансной) частоты в соответствии с [5], в виде $\Delta f = f_{res} - f_{resp} = 122,928$ кГц вызванное введением плазмы в резонатор с учётом воздействия тепловых потоков на конструктивные элементы ДПП, а также относительная чувствительность, как отношение изменения резонансной частоты к резонансной частоте $\Delta f/f_{res} = 4,7211 \times 10^{-4}$. Эти параметры являются характеристиками резонатора в первом приближении теории возмущений, когда связь характеристик резонатора с проводимостью плазмы можно считать линейной при отсутствии влияния магнитного поля. С другой стороны, если частота резонансного поля ω_{res} много больше частоты столкновений электронов и нейтральных частиц ν_{en} (табл. 1) запишем соотношение в соответствии с [5] в виде $\Delta\omega/\omega_{res} = \Delta f/f_{res} = 0,5 C_V (\bar{n}_e/n_c) (V_p/V_r)$. Здесь C_V – коэффициент учитывает распределение поля плазмы по объёму резонатора, V_r – объём резонатора, V_p – объём плазмы в резонаторе, \bar{n}_e – плотность усреднена по объёму плазмы, n_c – критическая плотность плазмы. Для дальнейших оценок $\Delta f/f_{res}$ будем считать, что $V_r = V_p$; $C_V = 1$ – пространственно-однородной плазмы; $n_c = 8,416 \times 10^8$ см⁻³. Тогда можно записать относительную чувствительность в виде $\Delta f/f_{res} = 0,5 \bar{n}_e/n_c = 2,733 \times 10^{-4}$, которая по смыслу совпадает с относительной чувствительностью

работы [8]. При этом относительная чувствительность отличается от предыдущего значения в 1,727 раза.

В условиях эксплуатации зонды ДПП подвергаются воздействию тепловых потоков, которые неравномерно распределены по площади конструктивных элементов, что может привести к неравномерным градиентам температуры и деформациям (смещениям). Предметом дальнейших исследований является определение влияния тепловых потоков круговой ССО на конструктивные элементы ДПП в составе наноспутника в условиях эксплуатации с целью возможности определения электронной плотности ионосферной плазмы на основе физико-математического моделирования.

Анализ результатов физико-математического моделирования

Расчёты нестационарных тепловых потоков, воздействующих на внешние поверхности ДПП представленной геометрической модели (рис. 1), проводились в соответствии с методикой [7], при этом использовались теплофизические, термомеханические и радиационные свойства (A_s – интегральный коэффициент поглощения, ε – излучательная способность) материалов (сталь нержавеющей, дюралюминий, медь, полиамид-имид, EP42HT-2LTE (2 component epoxy system) [13–15]. Вычисленные потоки используются в качестве граничных условий в задаче термоупругости для наноспутника, движущегося по круговой ССО высотой 550 км, с наклоном орбиты $97,44^\circ$ и продолжительностью витка 95 мин. Зависимость от времени углового распределения плотности теплового потока прямого солнечного излучения, падающего на боковую поверхность цилиндрических поверхностей зондов ДПП, определялась без учета парного затенения зондов.

В рамках физико-математического моделирования с учетом условий эксплуатации наноспутника SamSat-ION за время равное продолжительности пяти витков, проведен расчет температурных полей и полей смещений ДПП. Результаты решения задачи термоупругости зондов резонатора ДПП представлены в разные моменты времени на протяже-

нии 5-го витка на (рис. 2, 3), а динамика изменений суммарных деформаций (смещений) для пяти витков представлена на (рис. 4).

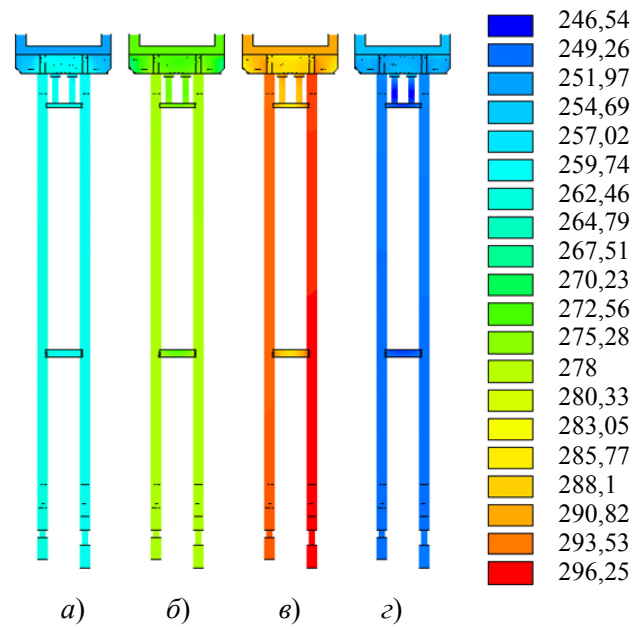


Рис. 2. Температурное поле ДПП, К: а) $t = 0,25$ витка; б) $t = 0,5$ витка; в) $t = 0,75$ витка; з) $t = 1$ виток

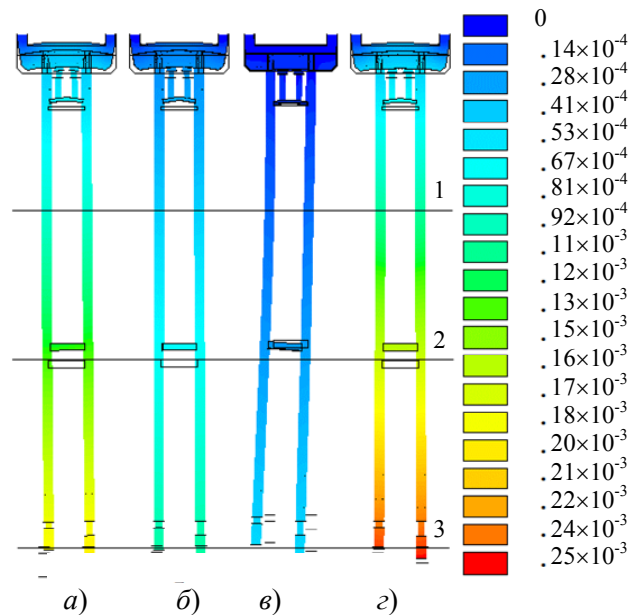


Рис. 3. Поле суммарных смещений ДПП, м: а) $t = 0,25$ витка; б) $t = 0,5$ витка; в) $t = 0,75$ витка; з) $t = 1,0$ виток; 1 – зона 1, 2 – зона 2, 3 – зона 3. Отсутствие смещений трубок зондов показано пунктиром

Анализ результатов расчёта показывает существенные изменения распределения температурных полей (рис. 2) и смещений стенок трубок (рис. 3) зондов резонатора ДПП в зависимости от воздействия Солнца, Земли и открытого космоса. Различие обусловлено не-

равномерностью распределения плотности тепловых потоков по поверхности наружных стенок трубок зондов резонатора ДПП в продольном и поперечных направлениях, а также поступающих и уходящих с поверхностей трубок зондов резонатора тепловых потоков, излучаемых в открытый космос.

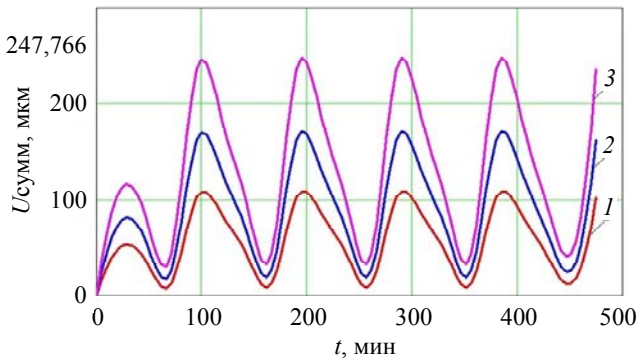


Рис. 4. Суммарные смещения стенок правого зонда резонатора во времени: 1 – зона 1; 2 – зона 2; 3 – зона 3

Причём изменение температуры на внутренней поверхности трубок происходит медленно из-за переизлучения внутренних полостей трубок зондов. Отличие температуры стенок зондов резонатора от референциальной температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ порождает пропорциональное (коэффициенту линейного расширения) изменению температуры смещение стенок относительно начального (недеформированного) состояния конструкции. Температурное поле, деформация зондов изменяются по КПЗ в зависимости от положения наноспутника на орбите. Суммарное смещение по абсолютной величине представляет собой квадратный корень из суммы квадратов смещений вдоль каждой оси декартовой системы координат. Изменение суммарных смещений от времени (рис. 4) в трёх зонах (1 – 103 мм, 2 – 186 мм, 3 – 287 мм) правого и левого зондов трубок резонатора ДПП носит квазипериодический колебательный характер, сопровождающийся «расширением» и «сжатием» их материала, обусловленных периодической сменой местоположения наноспутника относительно терминатора Земли. Поскольку распределение температурного поля по длине неравномерно возрастает к наружным краям трубок, то неравномерно и поле деформаций по длине трубки (рис. 2). Оно неравномерно также из-за наличия полиамида, поскольку на

границе соединения трубок резонатора и полиамида осуществляется передача тепла теплопроводностью, а в зондах трубок – посредством сложного теплообмена. На (рис. 4) графически представлены суммарные смещения в разных сечениях трубки (зоны 1–3), которые ведут себя таким образом, что в течение 1-го витка постоянно возрастают, а начинают уменьшаться только в начале следующего витка. Смещения во времени повторяются и носят квазипериодический характер. На рис. 2 наиболее сильный нагрев трубок происходит ближе к концу третьей четверти пятого витка. В течение следующей четверти витка температурное поле выравнивается как вдоль, так и поперёк трубок. При этом поле суммарных смещений (рис. 4) начинает уменьшаться с первой четверти 5-го витка до окончания третьей четверти и затем значения снова начинают возрастать. Динамика смещений приобретает квазипериодический характер, синхронно следуя за изменениями температуры зондов с определённой инерционностью закона теплопередачи внутри и на поверхности зондов в соответствии с законами теплопроводности и лучистого теплообмена. Кроме того, наблюдаются (рис. 3) смещения для различных зон зондов во времени (от четверти витка до целого витка). В результате суммарные радиальные и продольные смещения в 3D приводят к смещениям левой и правой трубки на угол, который квазипериодически изменяется от $0,36''$ до $3,097''$ в течение 5 витков (начиная с 65 минуты) (рис. 3) при перемещении наноспутника по орбите. Это суммарное радиальное смещение обусловлено наличием свободных (незакреплённых) концов трубок зондов. В результате ёмкость двухпроводной линии будет нарушена, что приведёт к изменению резонансной частоты ДПП. Оценим изменение ёмкости двухпроводной линии для усреднённых максимальных значений изменений продольной и поперечной деформаций (смещений), расстояния между трубками зондов ДПП, полученных на основе решения термоупругой задачи во времени эксплуатации пяти витков на заданной орбите. Определены: ёмкость $\Delta C(t)$ в плазме с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_p = 0,999453$, которая изменяется по КПЗ в интервале значений от $3,78921$ до $3,81339$ пкф, а относительное изменение

$\Delta C(t)/C_{vac}$ от $-4,08585 \times 10^{-3}$ до $2,27110 \times 10^{-3}$, где ёмкость C_{vac} в вакуумной среде. По этим величинам были определены: сдвиг резонансной частоты $\Delta f(t)$ в интервале значений от $-311,932$ до $550,597$ кГц, чувствительность $\delta f(t) = \Delta f(t)/f_{res}$ по отношению к резонансной частоте f_{res} с учётом деформаций трубок зондов, которые изменяются по КПЗ.

Результаты расчёта поперечных и продольных смещений медной трубки правого зонда, чувствительность резонатора ДПП представленные на (рис. 5) и в (табл. 2). В расчёте чувствительности резонатора учитывались смещения, которые образуются в результате деформаций трубок зондов в направлениях осей: x, y, z в декартовой системе координат. В левой трубке зонда результаты смещений будут отличны от правой трубки незначительно. Это отличие связано с неравномерностью поступающих и уходящих тепловых потоков с поверхности зонда.

Из анализа результатов (рис. 5) видно, что амплитуды продольной $\Delta L(t)$, поперечной $\Delta R(t)$ составляющих смещений медной трубки зонда и относительная чувствительность $\delta f(t)$ изменяются в интервале отрицательных и по-

ложительных значений по КПЗам во времени пяти витков при движении наноспутника по орбите. Это изменения связаны с деформациями «растяжения» и «сжатия» конструктивных элементов зондов ДПП относительно первоначального положения в отсутствии воздействия тепловых потоков ССО. Причём смещения в продольном и поперечном направлениях существенно отличаются, что связано с геометрическими размерами зондов и тепловыми потоками участвующими в теплообмене конструктивных элементов ДПП с космическим пространством. Из-за динамического характера смещений «растяжения» и «сжатия» происходит сдвиг резонансной частоты в сторону меньших и больших частот относительно резонансной частоты f_{res} в квазипериодическом режиме синхронно при перемещении наноспутника на солнечной и теневой стороне круговой ССО. В этих изменениях есть область, в которой продольные, поперечные смещения и относительная чувствительность имеют значения равное нулю, при которых влияние тепловых потоков отсутствует (приходящие и уходящие тепловые потоки компенсируют друг друга).

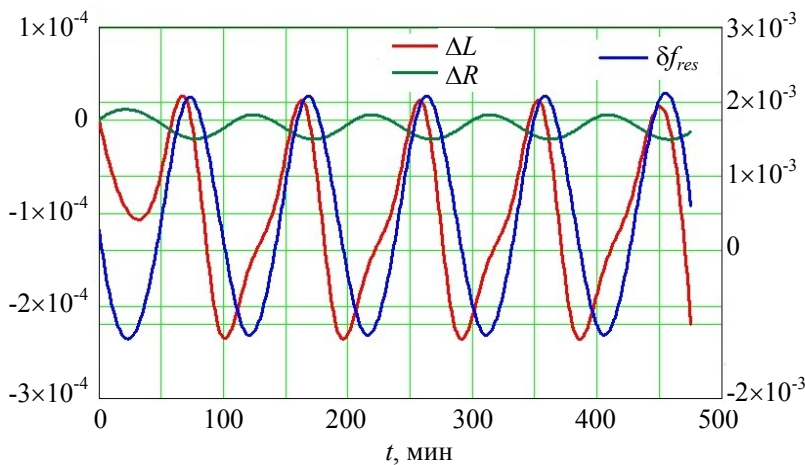


Рис. 5. Продольное и поперечное смещения правой трубки (левая шкала), м. Относительная чувствительность резонатора ДПП (правая шкала)

Исследуем динамику изменений диэлектрической проницаемости и плотности плазмы с учётом квазипериодической зависимости относительной чувствительности, сдвига резонансной частоты во время эксплуатации наноспутника на круговой ССО на основе расчёта по формулам: $\epsilon_p(t) = [\pi c / 2l_{tr_def}(t) 2\pi f_{res_def}(t)]^2$, (здесь $l_{tr_def}(t) = l_{tr} \pm \Delta l_{tr}(t)$ – деформированная длина зонда,

$\Delta l_{tr}(t)$ – смещение; $f_{res_def}(t) = f_{res} \pm \Delta f_{res}(t)$ – изменение резонансной частоты при деформации конструктивных элементов ДПП, $\Delta f_{res}(t)$ – сдвиг резонансной частоты), $n_e(t) = [1 - \epsilon_p(t)] n_c$ соответственно. Результаты расчётов представлены на (рис. 6 и 7).

Из анализа представленных результатов следует, что диэлектрическая проницаемость и

плотность плазмы изменяются по квазипериодическим законам синхронно во времени, периодически повторяя в течение пяти витков движения наноспутника. В моменты времени, когда диэлектрическая проницаемость плазмы равна $\varepsilon_p(t + \pi T/2) = \varepsilon_{vak} = 1$ (T – период движения наноспутника на круговой ССО), тогда $n_e(t + \pi T/2) = 0$. Этот результат соответствует поведению плазмы в высокочастотном поле, когда частота этого поля много больше частоты столкновений электронов с нейтральными частицами (табл. 1) при отсутствии влияния магнитного поля Земли. Отрицательные знаки относительной чувствительности, диэлектрической проницаемости, плотности плазмы нужно понимать, как изменения связанные со сдвигом резонансной частоты в область меньших частот относительно резонансной частоты. Эти изменения вызваны деформационными процессами конструктивных элементов при воздействии неравномерных тепловых потоков во время эксплуатации наноспутника на ССО.

В табл. 2а приведены значения моментов времени движения наноспутника для пяти витков, при которых относительная чувствительность датчика незначительно изменяется. Резонансный сдвиг в этом случае равен нулю, возможно точное измерение плотности плазмы. Целесообразно в эти моменты времени проводить измерения параметров для определения абсолютной электронной плотности плазмы. В этой таблице приведены данные относительной чувствительности для пятипроцентной области, в которой есть возможность измерения плотности плазмы с небольшим отличием от величины плотности плазмы, когда сдвиг резонанса равен нулю. При дальнейших отклонениях от резонанса возможны различия в измерении плотности плазмы, превышающие десять раз.

Оценим изменение резонансной частоты для максимальных смещений резонансной частоты: слева $\delta\omega_{lef} = \omega_{res} + \Delta\omega_{min}$ и справа $\delta\omega_{of} = \omega_{res} + \Delta\omega_{max}$ от резонансной частоты. «Критическая» плотность электронов $n_c = 8,416 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$.

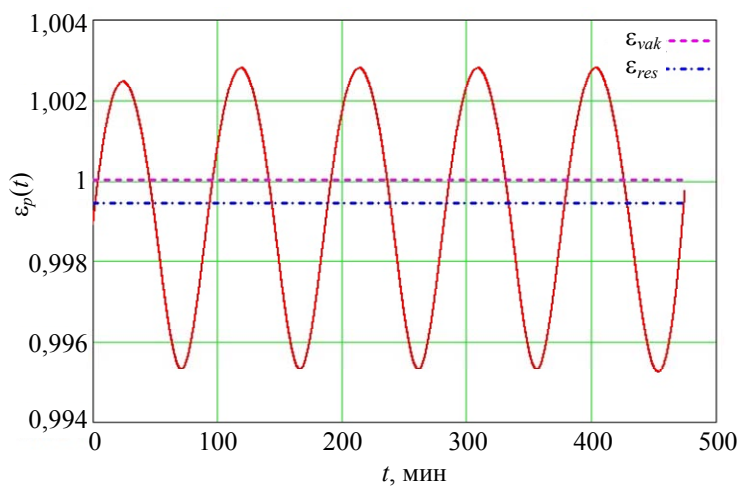


Рис. 6. Диэлектрическая проницаемость

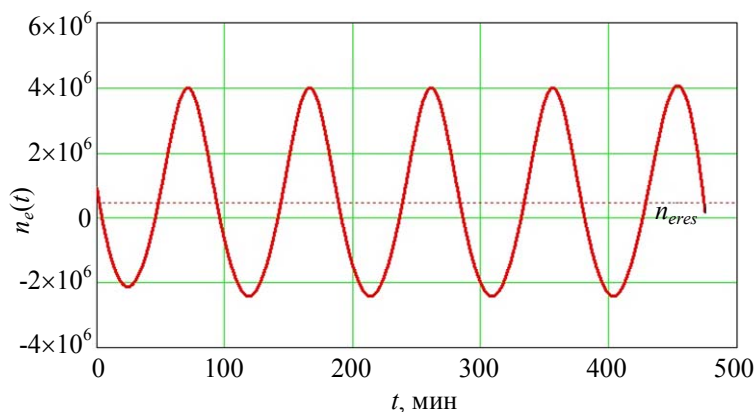


Рис. 7. Плотность электронной плазмы, $1/\text{см}^3$

Таблица 2а

Относительная чувствительность ДПП. Время измерения электронной плотности плазмы

Относительная чувствительность $\times 10^4$	Время измерения (движения спутника на ССО), мин	Электронная плотность плазмы $\times 10^{-5}$, см^{-3}	Относительная чувствительность $\times 10^4$	Время измерения (движения спутника на ССО), мин	Электронная плотность плазмы $\times 10^{-5}$, см^{-3}
Сдвиг резонансной частоты равен нулю			Отклонение от резонанса +5/-5%		
0,4219	1,881	4,61	0,534/0,2991	1,786/1,985	4,833/4,336
2,271	48,117	4,6	2,384/2,158	48,231/48,003	4,826/4,374
7,325	93,613	4,61	7,429/7,193	93,508/93,727	4,829/4,373
2,685	143,735	4,6	2,793/2,567	143,839/143,621	4,824/4,368
7,356	188,632	4,61	7,461/7,242	188,528/188,746	4,83/4,372
2,685	238,735	4,61	2,803/2,568	238,849/238,621	4,84/4,365
7,357	283,632	4,6	7,461/7,242	283,527/283,746	4,83/4,372
2,685	333,735	4,6	2,803/2,568	333,849/333,621	4,84/4,365
7,35	378,641	4,61	7,464/7,246	378,527/378,746	4,84/4,381
2,705	428,782	4,61	2,818/2,582	428,896/428,659	4,83/4,364
7,148	474,212	4,61	7,244/7,051	474,145/474,278	4,839/4,373

Таблица 2б

Изменения резонансной частоты, диэлектрической проницаемости, плотности плазмы

Сдвиг резонансной частоты, МГц	Изменение резонансной частоты $\times 10^{-9}$, с^{-1}	Диэлектрическая проницаемость плазмы	Оптические коэффициенты	Электронная плотность плазмы n_e , см^{-3}
$\Delta\omega_{\min} = 1,9599$	$\delta\omega_{\text{ref}} = 1,6336$	1,00185	$R_{p_{\min}} = 2,14 \times 10^{-7}$; $T_{p_{\min}} = 1, A_{p_{\min}} = 0$	$1,559 \times 10^6$
$\Delta\omega_{\text{res}} = 0$	$\omega_{\text{res}} = 1,63556$	0,99945	$R_{p_{\text{res}}} = 1,892 \times 10^{-8}$; $T_{p_{\text{res}}} = 1, A_{p_{\text{res}}} = 0$	$4,6 \times 10^5$
$\Delta\omega_{\max} = 3,4595$	$\delta\omega_{\text{of}} = 1,63902$	0,9952	$R_{p_{\max}} = 1,42 \times 10^{-6}$; $T_{p_{\max}} = 0,99999, A_{p_{\max}} = 0$	$4,007 \times 10^6$

Из результатов расчёта приведённых в (табл. 2а, 2б) следует:

- относительная чувствительность в диапазоне (10^{-4} – 10^{-6}) ДПП является определяющей величиной в определении возможности измерения плотности ионосферной плазмы; плотность плазмы (при выполнении условия резонанса) с высокой точностью можно определить однозначно, несмотря на флуктуацию относительной чувствительности при движении наноспутника на круговой ССО 550 км в течении пяти витков при воздействии тепловых потоков на конструкцию ДПП;

- плотность плазмы можно определить в области пятипроцентного ($\pm 5\%$) отклонения от резонанса и флуктуаций относительной чувствительности ДПП с меньшей точностью;

- измерение плотности плазмы при относительной чувствительности $\sim 10^{-3}$ нецелесообразно, поскольку есть значительные отличия (≥ 10 раз) по отношению к измеряемой плотности плазмы в случае резонанса;

- относительная чувствительность в области значений ≤ 0 связана с перераспределением тепловых потоков («теневая» сторона Земли), в этом случае сдвиг резонансной частоты происходит в область меньших значений по отношению к резонансной частоте;

- сдвиг резонансной частоты при воздействии тепловых потоков становится существенным при удалении от резонанса превышающую 5% область значений, при этом относительная чувствительность датчика достигает предельных значений ($-1,198 \times 10^{-3}$; $2,115 \times 10^{-3}$) в которых диэлектрическая проницаемость плазмы ($\epsilon_p > 1$), плотность плазмы ($\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$) принимают максимальные значения;

- точность измерений в определении абсолютной плотности электронной плазмы будет соответствовать высокой относительной чувствительности датчика в указанных точках времени движения наноспутника на ССО (табл. 2а);

– плазма не влияет на распространение зондирующей волны частотой 1 ГГц, поскольку отсутствует поглощение, незначительное отражение при прохождении электромагнитной волны через плазму;

– минимальная возможность измерений электронной плотности ионосферной плазмы ДПП ограничены интервалом значений $9,7 \text{ см}^{-3} - 1,69 \times 10^2 \text{ см}^{-3}$ в соответствии с КПЗ изменения относительной чувствительности от $0,4219 \times 10^{-4}$ до $7,356 \times 10^{-4}$, которые определялись из того, что $\delta n_e \approx 0,5 \delta f \times n_e$.

По данным электронной плотности плазмы табл. 2а оценим относительное изменение плотности плазмы по формуле $[n_e(t) - n_{e550}] / n_{e550} = (4,61 \times 10^5 - 4,6 \times 10^5) / 4,6 \times 10^5 = 2,174 \times 10^{-3}$ или 0,22 % с доверительной вероятностью 99,78 %. Здесь n_{e550} – плотность плазмы на орбите 550 км (табл. 1). Для оценки использовались данные Европейского Космического Агентства для околоземного пространства на высоте 550 км. Аналогично оценим относительное изменение плотности плазмы для допустимой пятипроцентная область значений плотности плазмы (доверительная вероятность 99,95 %). Относительное изменение плотности плазмы в этом случае будет $\leq 5,2$ %. Для других моменты времени отклонения результатов электронной плотности плазмы (рис. 7) от плотности $4,6 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ ССО 550 км (табл. 1) будут значительными. В силу того, что плотность плазмы на ССО изменяется по квазипериодическому закону (рис. 7), то целесообразно в условиях эксплуатации наноспутника проводить измерения электронной плотности плазмы с помощью ДПП в определённые временные интервалы. Эти временные интервалы приведены в табл. 2а для пяти витков. Для произвольного количества витков наноспутника на ССО с учётом квазипериодической зависимости плотности плазмы от времени можно определить плотность плазмы по формуле: $n_e(t + (T/2)n)$, где t – время измерения плотности плазмы; T_0 – период квазипериодической зависимости; $a \ n = 0, 1, \dots, K$ – конечное множество точек измерений.

Анализ изменений частотных характеристик резонатора

Анализируя результаты (рис. 3–5) видно, что температура и относительные смещения

изменяются по КПЗ синхронно во времени при движении наноспутника на орбите, как в поперечном, так и продольном направлениях зондов ДПП. Как было показано выше, изменения объема трубок зондов резонатора сопровождается сдвигом частоты резонанса ДПП. При этом сдвиг собственной резонансной частоты зондов аналогичным образом изменяется по КПЗ (рис. 5). Из анализа результатов (табл. 2) следует, что относительная чувствительность резонатора ДПП определяется посредством значения сдвига собственной частоты Δf резонатора в ограниченном интервале частот -311,932–550,597 кГц.

Из сравнения концентраций n_e (табл. 1) для высот от 400–600 км эксплуатации спутников и n_c следует, что плазма оказывает малое влияние на распространение зондирующей СВЧ электромагнитной волны. Это влияние подтверждается значениями коэффициентов отражения, пропускания и поглощения (табл. 2).

Заключение

В работе исследуется влияние тепловых потоков на работоспособность ДПП в составе наноспутника во время эксплуатации на ССО 550 км. Из оценок и расчёта сдвига резонансной частоты следует, что определяющей величиной относительной чувствительности ДПП является коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) материалов конструкции. Область изменения резонансной частоты можно уменьшить за счёт применения материалов с меньшим значением ($\leq 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) КЛТР, что позволит изменить отклонения результатов электронной плотности плазмы от плотности $4,6 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ в процентном соотношении. Для обеспечения минимальной деформации и высокой проводимости сопоставимой с медью необходимо использовать технологию двух и трёхслойных материалов конструкции зондов, один из которых будет стойким к воздействиям тепловых потоков, а другие обеспечивать высокую электропроводность. Известно, что доля участвующего теплового потока в теплообмене определяется площадью поверхности контакта с космическим пространством при лучистом теплообмене. Для определения плотности плазмы целесообразно использовать малогабаритные размеры зондов и увеличение частоты зонди-

рующего излучения для того, чтобы уменьшить влияние тепловых потоков.

Определены относительная чувствительность резонатора, показана возможность измерений плотности электронов ионосферной плазмы при минимальном сдвиге резонансной частоты. Область измерения плотности электронной плазмы ограничена временным интервалом положения наноспутника на орбите. По результатам оценки изменения относительной плотности электронов в работе установлены области допустимых измерений плотности плазмы с доверительной вероятностью 99,78 % и 95 %. В дальнейшем относительные изменения плотности плазмы будут учитываться при определении погрешности измерений в соответствии с классификациями погрешностей измерений.

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству науки и высшего образования РФ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fish C. S., Swenson C. M., Crowley G. et al. / Space Science Reviews. 2014. № 181. P. 61.
2. Чернышов А. А., Чугунин Д. В., Могилевский М. М., Моисеенко И. Л., Костров А. В., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Янин Д. В. / Изв. Вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 443.
3. Руководство по приборам и методам наблюдений. Т. IV – Космические наблюдения. – Женева: Из-во Всемирная метрологическая организация, 2018.
4. Song S., Kim H., Chang Y.-K. / International Journal of Aerospace Engineering. 2018. Vol. 2018. Article ID 2079219.
5. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. – М.: Наука, 1968.
6. Галка А. Г., Янин Д. В., Костров А. В., Климов С. И., Новиков Д. И. / Труды конференции молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом". – Иркутск, 2017. С. 173–175.
7. Цаплин С. В., Тюлевин С. В., Бобычев С. А., Романов А. Е. Основы теплообмена в космическом приборостроении. – Самара: Из-во Самарский университет, 2018.
8. Параметры магнитного поля для заданной орбиты: [https://spenvis.oma.be/htbin/spenvis.exe/TEMP?%23resetToPrevious\(blxtra_par.html\)](https://spenvis.oma.be/htbin/spenvis.exe/TEMP?%23resetToPrevious(blxtra_par.html)).
9. Параметры околоземного пространства для заданной орбиты: [https://spenvis.oma.be/htbin/spenvis.exe/TEMP?%23resetToPrevious\(leopold_par.html\)](https://spenvis.oma.be/htbin/spenvis.exe/TEMP?%23resetToPrevious(leopold_par.html)).
10. Александров А. Ф., Богданович Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы. – М.: Высшая школа, 1978.
11. Янин Д. В., Костров А. В., Смирнов А. И., Стриковский А. В. / ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 1. С. 133.
12. Янин Д. В., Костров А. В., Смирнов А. И., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Стриковский А. В. / ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 4. С. 42.
13. Таблица коэффициентов излучения материалов: <https://incoll.ru/primenenie/tablitisa-koeffitsientov-izlucheniya-materialov>.
14. Свойства материала: http://www.elektrosteklo.ru/Cu_rus.htm
15. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. – М.: Издательство «Металлургия», 1989.

PACS: 94.80. +g

Plasma density sensor sensitivity estimation under the influence of sun-synchronous orbit heat fluxes on probes

S. V. Tsaplin, I. V. Belokonov and S. A. Bolychev

Samara National Research University
34 Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia
E-mail: tsaplin56@yandex.ru

Received 24.10.2022; revised 17.01.2023; accepted 13.02.2023

The paper for the first time analyzes the influence of the structural elements thermomechanical state of the plasma density sensor (DPS) on the parameters dynamics of the reso-

nator under the influence of thermal fluxes of the circular SSO under operating conditions. By results analysis the temperature field and relative displacements of structural elements of DPP probes in the transverse and longitudinal directions as a result of thermoelastic deformations changes synchronously in time by quasi-periodic law during the nanosatellite orbit movement. Relative sensitivity ($1.198 \times 10^{-3} - 2.115 \times 10^{-3}$) of the resonator is proportional to the resonant frequency shift, was determined based on the results of deformation calculation in the model approximation of a two-wire line. Based on the results of the analysis, it was found that t the resonant frequency shift similarly changes according to a quasi-periodic law towards lower -311.93 kHz and higher frequencies 550.597 kHz relative to the resonant frequency in the absence of heat fluxes during five orbits of the nanosatellite around the Earth. In this frequency range, the values of the permittivity and density of the electron plasma were calculated. The possibility of measuring the density of an electron plasma at times when the resonant shift is zero is investigated. The admissible 5 % region of plasma electron density is determined, in which the resonant shift insignificantly affects the possibility of accurate measurement of the plasma density. At other times, the shift in the resonant frequency leads to a change in the dielectric constant of the plasma, and as a result, the accuracy of plasma density measurements will decrease. The relative sensitivity of the DFS is an important characteristic in determining the possibility of measuring plasma density. To obtain reliable results of plasma density measurements, the required relative sensitivity of the sensor should be $\sim (10^{-4} - 10^{-5})$.

Keywords: resonance, plasma density sensor, resonant RF probe, resonant frequency shift, relative sensitivity, resonator, temperature gradient, thermoelastic deformations, inhomogeneous ionosphere, plasma frequency, electron density.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-115-127

REFERENCES

1. Fish C. S., Swenson C. M., Crowley G. et al., Space Science Reviews, № 181, 61 (2014).
2. Chernyshov A. A., Chugunin D. V., Mogilevskij M. M., Moiseenko I. L., Kostrov A. V., Gushchin M. E., Korobkov S. V. and Yanin D. V., Journal of Instrument Engineering **59** (6), 443 (2016).
3. Guide to Instruments and Methods of Observation. Vol. IV – Space-based Observations, Geneva, World Meteorological Organization, 2018.
4. Song S., Kim H. and Chang Y.-K., International Journal of Aerospace Engineering **2018**, 2079219 (2018).
5. Golant V. E., Microwave Methods in Plasma Investigations, Moscow, Nauka, 1968.
6. Galka A. G., Yanin D. V., Kostrov A. V., Klimov S. I. and Novikov D. I. Proc. XV Young Scientists' Conference "Interaction of fields and radiation with matter". Irkutsk, 2017, pp. 173–175.
7. Tsaplin S. V., Tulevin S. V., Bolychev S. A. and Romanov A. E., Fundamentals of heat transfer in space instrumentation, Samara, Samara University, 2018.
8. Magnetic field parameters for a given orbit: [https://spenvis.oma.be/htbin/spenvis.exe/TEMP?%23resetT oPrevious\(blxtra_par.html\)](https://spenvis.oma.be/htbin/spenvis.exe/TEMP?%23resetT oPrevious(blxtra_par.html)).
9. Near-Earth space parameters for a given orbit: [https://spenvis.oma.be/htbin/spenvis.exe/TEMP?%23resetT oPrevious\(leopold_par.html\)](https://spenvis.oma.be/htbin/spenvis.exe/TEMP?%23resetT oPrevious(leopold_par.html)).
10. Aleksandrov A. F., Bogdanovich L. S. and Rudhadze A. A., Fundamentals of Plasma Electrodynamics, Moscow, Vysshaya shkola, 1978.
11. Yanin D. V., Kostrov A. V., Smirnov A. I. and Strikovskij A. V. Technical Physics **78** (1), 133 (2008).
12. Yanin D. V., Kostrov A. V., Smirnov A. I., Gushchin M. E., Korobov S. V. and Strikovskij A. V., Technical Physics **82** (4), 42 (2012).
13. Material emissivity table: <https://incoll.ru/primeneniye/tablitza-koeffitsientov-izlucheniya-materialov>.
14. Material properties: http://www.elektrosteklo.ru/Cu_rus.htm
15. Zinov'ev V. E., Thermophysical properties of metals at high temperatures. Reference book, Moscow, Metallurgiya, 1989.