

РАЗВИТИЕ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА СВЧ-ЗОНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

А.Г. Галка, А.В. Костров, М.С. Малышев, И.М. Вершинин

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

galasnn@ipfran.ru

1. Введение

Основная информация о строении и динамике околоземной плазмы получена с помощью ставших уже классическими спутниковых радиофизических методов зондирования (Ленгмюровские зонды, импедансные методы, ионозонды и т. д.). Эти методы успешно применяются и сегодня. Однако решение вопросов, связанных с детальной диагностикой и прогнозом ионосферных возмущений, выдвигает новые, более высокие требования к техническим характеристикам зондирующих спутниковых систем, а также к качеству получаемой информации. Современная тенденция к миниатюризации космических аппаратов подтверждается статистикой роста запусков наноспутников, способных решать задачи гражданского и военного назначения. Важными требованиями к аппаратуре является малый вес, небольшая потребляемая мощность, невысокая стоимость, электромагнитная совместимость, возможность работы в непрерывном режиме. Исследования ионосферы подошли сейчас к такой стадии, когда возникла необходимость в разработке нового поколения диагностической аппаратуры, способной регистрировать ионосферные возмущений концентрации с временным разрешением до 1с и пространственным разрешением до 10 км и менее, а также позволяющей изучать волновые эффекты в ионосфере, сопровождающиеся флуктуациями электронной концентрации в широком спектральном диапазоне.

Настоящая работа посвящена развитию нового резонансного метода измерения концентрации ионосферной плазмы и исследования ее пространственно-временных флуктуаций на мало-размерных спутниках класса микро- и нано. Высокое пространственно-временное разрешение измерения концентрации ионосферной плазмы, а также широкий спектральный диапазон ее флуктуаций имеют научную значимость для глобального мониторинга ионосферной плазмы. В основе работы датчика параметров плазмы лежит принцип плазменного зонда с СВЧ-резонатором [1], успешно используемый в лабораторных экспериментах. Резонатор выполнен на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии. Собственная частота f резонатора зависит от диэлектрической проницаемости среды ϵ , в которую он погружен. Зная частоту в плазме f и без плазмы f_0 , можно найти концентрацию электронов $N_e = \pi m / e^2 * (f^2 - f_0^2)$, где m и e – масса и заряд электрона. При стандартном подходе точность определения N_e ограничена шириной резонансной кривой, а минимальное значение N_e обратно пропорционально квадрату длины l и добротности Q резонатора: $\min(N_e) \sim 1 / (l^2 * Q)$. Оценки показывают, что для измерения ионосферной плазмы требуется зонд длиной несколько десятков метров, что недопустимо на мало-размерных спутниках.

В работе предлагается сократить длину зонда соразмерно с длиной спутника, а точность измерений улучшить с помощью амплитудно-фазового метода [2]. В докладе приведено описа-

ние макета датчика параметров плазмы, максимально приближенного к летному образцу. Основное внимание уделено проработке и апробации нескольких вариантов конструкции датчика и влиянию теплового нагрева на параметры зонда.

2. Датчик параметров плазмы

Датчик состоит из контактируемого с плазмой резонатора, закрепленного на корпусе спутника, и блока электроники, размещенного внутри космического аппарата. Четвертьволновый резонатор изготовлен из двух параллельных медных трубок длиной 40 см (рис. 1 а).

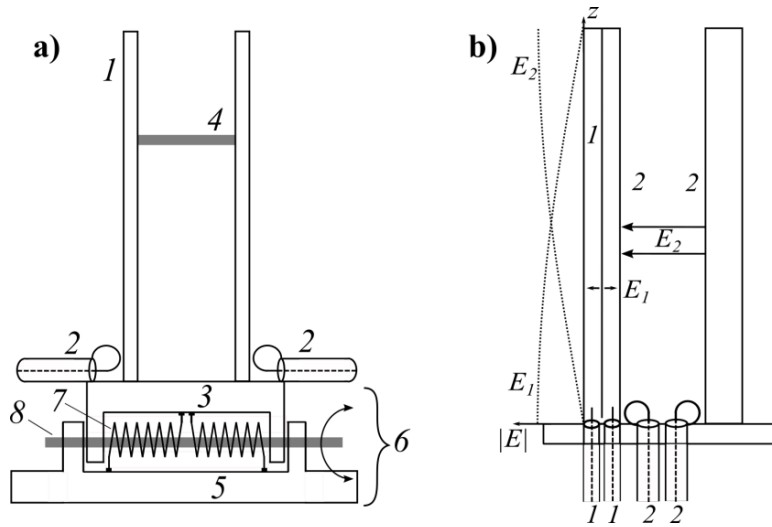


Рисунок 1

а) Схема четвертьволнового резонатора датчика параметров плазмы:

- 1 – трубки резонатора, 2 – возбуждающая и приемная линии с магнитными петлями связи, 3 – закороченный конец резонатора, 4 – диэлектрическая перемычка, 5 – корпус спутника, 6 – узел раскрытия, 7 – пружина кручения, 8 – ось вращения.

Стрелками показано вращения при выведении резонатора из транспортного (сложенного) состояния в рабочее положение.

б) Схема датчика параметров плазмы с опорным резонатором:

индексом 1 обозначены элементы опорного (коаксиального) резонатора, индексом 2 - измерительного.

Собственная частота датчика 180 МГц выше характерной частоты собственных волн в ионосферной плазме, в том числе плазменной f_{pe}^2 , и частоты столкновения частиц, поэтому выражение для диэлектрической проницаемости плазмы имеет простой вид: $\varepsilon = 1 - f_{pe}^2/f^2$. Быстродействие датчика, определяемое добротностью резонатора ($Q=220$), позволяет фиксировать флуктуации плотности плазмы с субмикросекундным временным разрешением. Со стороны корпуса спутника трубки соединены медной перемычкой. В этом месте установлены петли возбуждения и приема сигнала с резонатора. Выведение резонатора из транспортного (сложенного) состояния в рабочее положение осуществляется с помощью осевого узла раскрытия за счет пружинного механизма. Наличие плазмы с концентрацией $10^3 - 10^6 \text{ см}^{-3}$ в области высокочастотного поля двухпроводной линии приведет к сдвигу собственной частоты резонатора в диапазоне 280 Гц-280 КГц, что не превосходит ширины резонансной кривой $f_0/Q = 800 \text{ КГц}$. Для малых частотных сдвигов порядка несколько сотен герц предлагается использовать амплитудно-фазовый метод. В данной схеме выходной сигнал пропорционален разности фаз между опорным плечом и сигналом, прошедшим через резонатор с плазмой. Сдвиг фазы $\Delta\varphi$ определяется изменением диэлектрической проницаемости плазмы, т.е. концентрацией электронов: $\Delta\varepsilon = \varepsilon - 1 = -N_e \cdot$

$e^2/(f^2\pi m)$. Усиленный выходной сигнал с фазового детектора почти во всем диапазоне измерений линейно связан с N_e : $U_{\text{вых}} = k * N_e$, где коэффициент пропорциональности k определяется в результате частотной калибровки датчика без плазмы. Ранее было показано, что применение амплитудно-фазового метода позволяет уменьшить минимальное значение концентрации, тем самым расширив диапазон измерений на два порядка [2]. Применительно к измерению содержания влаги в воздухе при пониженном давлении разработан полуволновый коаксиальный датчик и продемонстрирована чувствительность измерительной системы к изменению диэлектрической проницаемости в 7 знаке после запятой [3].

3. Влияние температуры на резонансные характеристики датчика

При использовании датчика в натуральных условиях следует учитывать влияние температуры на показания прибора вследствие изменения геометрических размеров резонатора. Учитывая, что собственная частота датчика без плазмы $f_0 = c/4l$, то при изменении температуры проводников на ΔT частотный сдвиг Δf будет равен $\Delta f = f_0 * \alpha * \Delta T$, где α (K^{-1}) – линейный коэффициент теплового расширения. Температурные вариации в натуральных условиях могут составлять несколько десятков градусов и влиять на показания датчика. Возможны несколько вариантов уменьшения теплового влияния.

Исходя из особенности конструкции датчика плазмы, наиболее перспективным способом уменьшения теплового воздействия является использование материалов с минимальным коэффициентом теплового расширения в составе проводников резонатора. В качестве демонстратора таких проводников использовались стержни из углепластика, запрессованные внутрь медных трубок. Результаты экспериментов при тепловом нагреве на $\Delta T=45$ К продемонстрировали постоянство длины проводника с карбоновым заполнением, в то время, как удлинение полый медной трубки на $\Delta l = 0.2$ мм соответствовало теоретическому значению с коэффициентом линейного расширения $\alpha = (\Delta l/l)/\Delta T = 1.7 * 10^{-5} K^{-1}$.

Температурная компенсация в резонансном методе также может быть реализована с помощью опорного резонатора [4], суть которого заключается в сравнении показаний двух резонаторов с близкими собственными частотами (рис. 1 б). Одна из трубок резонатора с дополнительным тонким проводником внутри является опорным четвертьволновым коаксиальным резонатором, собственная частота f_1 которого определяется только длиной, т.е. температурой: $f_1 = f_{01} * (1 - \alpha_1 * \Delta T)$. Собственная частота основного (четвертьволнового) резонатора f_2 зависит как от температуры, так и от концентрации плазмы: $f_2 = f_{02} * (1 - \alpha_2 * \Delta T) * (1 - 0.5 * \Delta \epsilon(N_e))$. Соответствующие выражения для частотных сдвигов имеют вид: $\Delta f_1 = -\alpha_1 * f_1 * \Delta T$, $\Delta f_2 = -\alpha_2 * f_2 * \Delta T - 0.5 * \Delta \epsilon(N_e) * f_2$. В результате теплового нагрева получены коэффициенты α : $\alpha_1 = 2.19 * 10^{-5} K^{-1}$, $\alpha_2 = 2.51 * 10^{-5} K^{-1}$. Таким образом, выражение для Δf_2 в зависимости от концентрации плазмы N_e имеет вид: $0.5 * \Delta \epsilon(N_e) = -(\Delta f_2)/f_2 + \alpha_2/\alpha_1 * (\Delta f_1)/f_1$, где $\Delta \epsilon(N_e)$ - линейная зависимость.

Для уменьшения влияния теплового фактора на геометрические размеры резонаторы применялись композитные материалы с минимальным коэффициентом линейного температурного расширения. Результаты экспериментов при тепловом нагреве на $\Delta T = 45$ К продемонстрировали постоянство длины проводника при погрешности измерений 10 мкм, в то время, как удлинение полый медной трубки на $\Delta l = 0.2$ мм соответствовало теоретическому значению с коэффициентом линейного расширения $\alpha = (\Delta l/l)/\Delta T = 1.7 * 10^{-5} K^{-1}$.

4. Развитие резонансного метода для измерения концентрации плазмы

Особенность резонансного способа измерения диэлектрических свойств плазмы, как среды с частотной дисперсией $\varepsilon = \varepsilon(f)$, заключается в том, что относительный частотный сдвиг $\delta = \Delta f/f$ увеличивается при уменьшении частоты f и неизменных параметрах плазмы. Для среды без дисперсии, например, неполярного газа, δ не зависит от частоты измерений. Также δ не зависит от f при тепловом нагреве. Это обстоятельство послужило основанием для модификации резонаторного датчика параметров плазмы. Суть изменений заключается в уменьшении собственной частоты измерительной системы и переходе от распределенного резонатора к сосредоточенному колебательному контуру с измерительной емкостью C в виде двух параллельных проводников и параллельно соединенной индуктивностью L (рис. 2 слева). Уменьшение собственной частоты с одной стороны повышает чувствительность датчика, а с другой, уменьшает влияние температуры на его показания. Примером такой конструкции является датчик концентрации плазмы длиной 28 см, разработанный для наноспутника SamSat-ION формата 10x10x30 см совместно с сотрудниками Самарского университета им. С.П. Королева (рис. 2 справа).

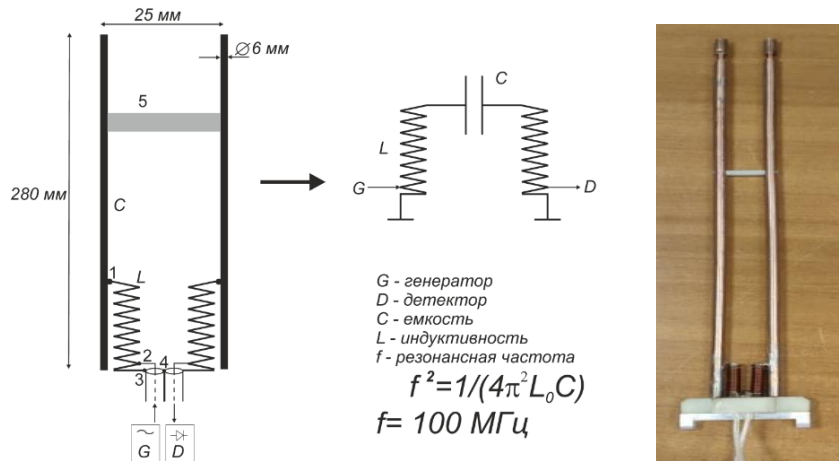


Рисунок 2 - Чувствительный элемент датчика параметров плазмы

для наноспутника SamSat-ION формата Cubsat 1U-3U. Слева электрическая схема, справа - фотография макета.

В ходе испытаний на вибростенде продемонстрирована устойчивость конструкции к вибрации. Эксперименты в климатической камере подтвердили отсутствие влияния температуры на показания датчика. Измерения концентрации плазмы проводились на стенде «Ионосфера», предназначенном для моделирования электрофизических процессов в ионизированных оболочках Земли, включая плазменные испытания образцов космической техники. В результате экспериментов установлено, что датчик уверенно регистрирует значение концентрации плазмы в диапазоне $10^3 - 10^6 \text{ см}^{-3}$.

5. Заключение

В работе предложен и апробирован амплитудно-фазовый метод для измерения ионосферной концентрации плазмы и ее пространственно-временных флуктуаций. Разработана конструкция датчика концентрации плазмы для малогабаритного спутника, состоящего из резонатора на корпусе спутника и блока электроники внутри космического аппарата. Собственная частота резонатора 180 МГц, добротность 220. Предложен и реализован метод опорного резонатора для температурной компенсации показаний датчика. Продемонстрирована возможность закрепле-

ния измерительных проводников с помощью композитных материалов с минимальным коэффициентом теплового расширения. Показано, что понижение собственной частоты повышает чувствительность измерительной системы и снижает негативное влияние теплового расширения на геометрические размеры датчика. В рамках данного подхода разработан и изготовлен образец плазменного датчика с резонансной частотой 100 МГц для наноспутника SamSat-ION. В результате испытаний на плазменном стенде в условиях, максимально приближенных к натурным, подтверждена возможность измерения концентрации ионосферной плазмы в диапазоне $10^3 - 10^6 \text{ см}^{-3}$.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-22-20093)

Список литературы:

1. Stenzel R.L. Microwave resonator probe for localized density measurements in weakly magnetized plasmas // Review of Scientific Instruments. 1976. V. 47, № 5. 603-607. DOI: 10.1063/1.1134697.
2. Wide-range measurements of plasma density using a hairpin resonance microwave probe / A.G. Galka, D.V. Yanin, A.V. Kostrov [et al.] // Journal of Applied Physics. 2019. V. 125(12), 124501. DOI: 10.1063/1.5082169.
3. Microwave Cavity Sensor for Measurements of Air Humidity under Reduced Pressure / A.G. Galka, A.V. Kostrov, S.E. Priver [et al.] // Sensors. 2023. V. 23, 1498. DOI: 10.3390/s23031498.
4. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 404 с.