

УДК 53.087.044

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТОКА НА БОРТУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. Е. Корепанов, Ф.Л. Дудкин

MEASUREMENTS OF SPATIAL CURRENT DENSITY ONBOARD SPACECRAFT

V.E. Korepanov, F.L. Dudkin

Приведен расчет основных параметров щелевого зонда Ленгмюра (ЩЗЛ), погруженного в плазму, без учета магнитного поля. Описана конструкция волнового зонда (ВЗ) и обсуждены результаты его использования на борту КА «Сич-1М», а также перспективы его применения в новых космических экспериментах.

The present report is dealing with detailed analysis of methodology of wave probe (WP) use onboard spacecrafts. Main parameters of split Langmuir probe (SLP) in plasma without magnetic field are calculated. The WP construction is described and the results of its use onboard sich-1m satellite are discussed.

Введение

Вариации плотности пространственного тока являются основной причиной возникновения волновых процессов в космической плазме (это прямо следует из уравнений Максвелла). Естественно, они обуславливают и появление переменного магнитного поля. Отсюда понятна и важность прямых измерений плотности пространственного тока (ППТ). В зависимости от области космического пространства, эта величина может варьироваться от $\sim 10^{-8}$ А/см² в области электроджета до 10^{-14} А/см² и менее в межпланетном пространстве.

Плотность электрического тока в космической плазме J может быть вычислена, если известны концентрация и скорость ионов (n_i, v_i) и электронов (n_e, v_e):

$$J = e(n_i v_i - n_e v_e),$$

где e – заряд электрона.

Если измерение концентрации электронов и ионов, а также скорости ионов вполне технически решаемая задача, то прямое измерение направленной скорости электронов приводит к очень высоким погрешностям из-за высокой тепловой скорости этих частиц, которая значительно превышает среднюю скорость их упорядоченного движения. В качестве выхода из положения можно использовать закон Ампера, однако, чтобы найти плотность тока, необходимо знать, как изменяется магнитное поле в пространстве. Для таких измерений нужны четыре спутника. Этот достаточно сложный метод был реализован в проекте «Cluster». Наиболее перспективным решением является здесь использование прямого метода измерения плотности тока. Однако до последнего времени эту задачу не удавалось решить из-за ряда специфических трудностей:

1. Необходима высокая чувствительность измерителя (порог не ниже 0.1 нА/см²);
2. Необходим широкий частотный диапазон измерений, поскольку волновые процессы в космической плазме происходят в диапазоне частот от миллигерц до мегагерц;
3. Необходима малая зависимость результатов измерения от специфических факторов космического пространства, в первую очередь – от солнечного освещения.

Первая попытка прямых измерений плотности пространственного тока (ППТ) в ионосфере была предпринята в конце 60-х г. в США под руководством Ф. Мозера с помощью предложенного им прибора, названного «щелевой зонд Ленгмюра» (ЩЗЛ). Первый вариант ЩЗЛ состоял из двух проводящих пластин, разделенных тонким изолятором. На эти пластины одновременно подавался пилообразный сигнал, смещающий их потенциал от положительного до отрицательного относительно плавающего потенциала. Такой ЩЗЛ был впервые использован в 1968 г. в эксперименте на геофизической ракете, запущенной до высоты ~ 300 км [1, 2, 3]. С его помощью путем измерения тока на каждую пластину и разности токов между ними предполагалось получить информацию о плотности тока в плазме, потоке заряженных частиц, плотности и температуре электронов. К сожалению, эксперимент оказался неудачным из-за некоторых принципиальных недостатков конструкции и методики использования ЩЗЛ, приведших к его низкой чувствительности для измерений в плазме. Результаты измерений оказались слишком зависимыми от разности площади пластин и работы выхода электронов, асимметрии цепей входного усилителя и эффектов следа. К тому же прикладываемое к пластинам пилообразное напряжение создавало широкополосный шум. Эта неудача надолго отвлекла внимание экспериментаторов от попыток дальнейшего усовершенствования ЩЗЛ. В 80-х гг. на ЩЗЛ обратил внимание О. Вайсберг (ИКИ АН СССР) – он, по-видимому, был первый, кто показал, что, измеряя одновременно ортогональные компоненты вариаций ППТ и магнитного поля, можно на борту одного космического аппарата (КА) разделить пространственные и временные изменения токовых структур [4]. Немного позже эту идею обсуждали и другие авторы.

Все это объясняет начавшиеся в 80-х гг. повторные попытки измерения ППТ с помощью различных приборов. Прежде всего, для решения этой задачи пытались применить широко известный и успешно опробованный во многих экспериментах прибор под названием «цилиндр Фарадея». Этот прибор измеряет интегральный поток заряженных частиц через входное отверстие заданного диаметра, однако его чувствительность не удовлетворяет требованиям, приведенным выше (см. п. 1) [5].

Достаточно экзотический прибор для измерения ППТ был предложен Р. Граром [6]. Он состоит из системы проводящих пластин (по 2 вдоль каждой компоненты), каждой из которых соответствует направленный в противоположную сторону излучатель. При этом электронная схема должна была обеспечить равенство измеряемого тока, создаваемого потоком заряженных частиц на пластину по каждому из 6 направлений, и потока, излучаемого в противоположную сторону. Естественно, что эта слишком сложная конструкция никогда не была реализована.

Более реальными были попытки измерения ППТ с помощью так называемого «пояса Роговского» (ПР), работа которого основана на законе магнитной индукции: поток переменного тока через замкнутый сердечник создает в нем магнитное поле, которое, в свою очередь, вызывает появление э.д.с. в нанесенной на сердечник обмотке, а наведенная э.д.с. уже измеряется вольтметром. Первая попытка построения ПР феррорезонансного типа для измерения постоянной компоненты ППТ показала, что, к сожалению, этот прибор также не подходит для этой цели по причине низкой чувствительности: для реализуемых в космических экспериментах размеров был получен порог чувствительности всего в 10^{-6} А/см² [7].

Развитие этого метода для измерения переменного тока все же позволило создать ПР индукционного типа, имеющий достаточно высокий порог чувствительности – до 10^{-12} А/см² [8]. Однако и этот вариант ПР имеет свои принципиальные ограничения. В первую очередь, это достаточно узкий рабочий частотный диапазон от десятка до нескольких сотен герц в лучшей из известных конструкций [9], т. е. этот прибор не соответствует критерию 2. К тому же он оказался чрезвычайно чувствительным к изменениям окружающего магнитного поля, что не позволило получить сколько-нибудь приемлемые результаты в первых экспериментах на геофизических ракетах. Однако следует все же отметить удачную попытку использования ПР на борту спутника «Сич-1М» (2004 г.): впервые с его помощью были получены результаты измерения ППТ, хотя и сильно зашумленные, но количественно подтвержденные другими приборами [10].

В бывшем Советском Союзе работы по усовершенствованию конструкции ЩЗЛ и методики его использования продолжались. Насколько нам известно, первая удачная попытка измерений ППТ с помощью ЩЗЛ состоялась на борту КА «Прогноз-10» (1985 г.): вычисленные и измеренные значения ППТ в области головной ударной волны оказались достаточно близкими [5, 11]. На таком же качественном уровне были реализованы измерения ППТ в области каспа на борту КА «Интербол-1» (1995–2000 гг.) с помощью упрощенного варианта ЩЗЛ [12]. Хотя из-за некоторых недостатков конструкции этого варианта ЩЗЛ и недостаточно обоснованного его согласования со средой достаточно точных результатов измерений получить не удалось, все же полученные данные оказались достаточно близкими к расчетным оценкам [5].

Накопленный экспериментальный опыт и проведенные расчеты позволили усовершенствовать этот прибор и создать новую конструкцию под названи-

ем «волновой зонд» (ВЗ) [13]. Основой ВЗ является цилиндрический индукционный магнитометр, на который нанесены две полуцилиндрические проводящие пластины, разделенные узким промежутком и соединенные сопротивлением R заданной величины (рис. 1). Как следует из рис. 1, с помощью этого прибора можно одновременно в одной точке пространства измерять флуктуации ППТ и магнитного поля. Отметим, что в принципе этот прибор позволяет измерять и третью физическую величину – электрический потенциал в данной точке пространства [14]. Но, поскольку это несущественно для цели данной работы, такой вариант ВЗ здесь рассмотрен не будет. Впервые ВЗ был использован в международном эксперименте «Вариант» на борту украинского спутника для дистанционного зондирования Земли «Сич-1М» (2004 г.). Из-за частичной неудачи запуска (отказ третьей ступени ракеты-носителя) этот КА проработал в штатном режиме очень короткое время. Но тем не менее, с его борта поступила информация, которая убедительно доказала работоспособность ВЗ и впервые в мире подтвердила возможность получать с его помощью достаточно точные данные о ППТ в ионосфере.

ЩЗЛ – принцип действия и согласование со средой.

Таким образом, в одном корпусе рассматриваемого варианта ВЗ находятся два прибора – ЩЗЛ и индукционный магнитометр. Отметим особую важность этого обстоятельства для изучения волновых процессов, поскольку все измерения в этом случае реально относятся к одной точке пространства, а не разнесены, как в предыдущих экспериментах [11, 12].

Нет смысла останавливаться здесь на принципе действия индукционного магнитометра, который достаточно известен. Желая ознакомиться с особенностями его проектирования подробнее можно отправить к специальной литературе [15]. Однако принцип действия ЩЗЛ и в особенности условия его согласования со средой следует рассмотреть подробно. В первом приближении найдем эти условия для ионосферной плазмы без магнитного поля.

Обратимся снова к рис. 1. Очевидно, что сигнал на входе усилителя токового канала J_Z будет равен [14]:

$$U = KJ, \quad (1)$$

где

$$K = K_0, K_1, K_2 \quad (2)$$

коэффициент преобразования ЩЗЛ, в котором

$$K_0 = SR \quad (3)$$

(S – поперечное сечение одной пластины ЩЗЛ)

$$K_1 = 1/(1+R(Y+Ya)), \quad (4)$$

$$Y = 1/(Ze_1+Ze_2), \quad (5)$$

Ze_i – импеданс пластины ЩЗЛ, $i=1, 2$, Ya – эквивалентный адмиттанс входной цепи усилителя, K_2 – нормализованный коэффициент преобразования конкретной входной цепи усилителя, R – сопротивление измерительного резистора.

Аппроксимируем длинную полуцилиндрическую пластину ЩЗЛ удлиненным эллипсоидом [16]:

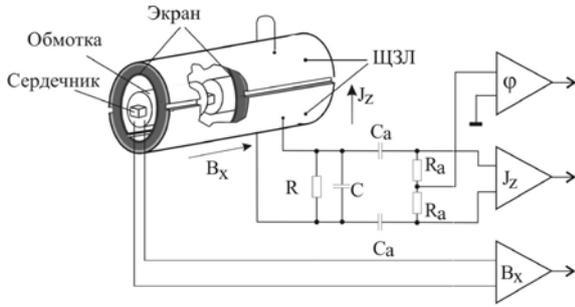


Рис. 1. Функциональная схема волнового зонда с усилителем.

$$Z_{ei} = (2\pi c\sigma_s)^{-1} (Q(\eta_0) + (\sigma_s/\sigma - 1)Q(\eta_e)), \quad (6)$$

$$Q(\eta) = \ln((\eta+1)/(\eta-1)), \quad (7)$$

$\eta_0 = (1 - (a/b)^2)^{-0.5}$, $\eta_e = (1 - (a_e/b_e)^2)^{-0.5}$, $c = (b^2 - a^2)^{0.5}$, a , b – меньшая и большая полуоси эллипсоида, $a_e = a + s$, $b_e = b + s$, s – толщина плазменного слоя. Для удлиненного эллипсоида, в котором $b_e/a_e \gg 1$, можно принять $b = b_e = c$, a – радиус, $aL = 2b$ – длина одной пластины ЩЗЛ,

$$Z_{ei} = (2\pi L\sigma_s)^{-1} (\ln(a_e/a) + (\sigma_s/\sigma)\ln(L/a_e)), \quad (8)$$

где σ_s и σ – комплексные проводимости плазменного слоя и ионосферной плазмы,

$$\sigma_s = Y_s(f)\lambda_D/S, \quad (9)$$

$\lambda_D = (\epsilon_0 k T_e / (e^2 n_e))$ – электронный радиус Дебая, ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая постоянная свободного пространства, k – постоянная Больцмана, T_e – температура электронов, e и n_e – заряд и концентрация электронов, $Y_s(f)$ – адмиттанс плазменного слоя при плавающем потенциале.

В максвелловской плазме без магнитного поля для $s \ll a$ можно принять:

$$Y_s(f) = Y_{re} + jY_{im} \quad [17],$$

где

$$Y_{re} = S\epsilon_0 u / \lambda_D^2, \quad Y_{im} = \omega C_s, \quad (10)$$

u – скорость спутника, ω – угловая частота измеряемого тока, C_s – емкость слоя у одной пластины ЩЗЛ:

$$C_s = (S\epsilon_0 / \lambda_D) \left(2 \ln \left(u^{-1} (kT_e / (2\pi m_e))^{0.5} \right) \right)^{0.5}. \quad (11)$$

В приближении немагнитной плазмы σ может быть записано в виде [18]:

$$\sigma = \sigma_{re} + j\sigma_{im}, \quad (12)$$

где

$$\sigma_{re} = n_e e^2 \nu / (m_e (\omega^2 + \nu^2)) \quad (13)$$

$$\sigma_{im} = \omega (\epsilon_0 - n_e e^2 \nu / (m_e (\omega^2 + \nu^2))) \quad (14)$$

ν – частота столкновений электрон – ион, m_e – масса электрона.

Дальнейшие вычисления проведем для конкретных условий работы ВЗ в эксперименте «Вариант» на борту спутника «Сич-1М» в ионосферной плазме на высотах 300–400 км [19]. Для этого случая амплитудно-частотная зависимость нормализованной передаточной функции K/K_0 для диапазона частот 1 Гц – 15 кГц

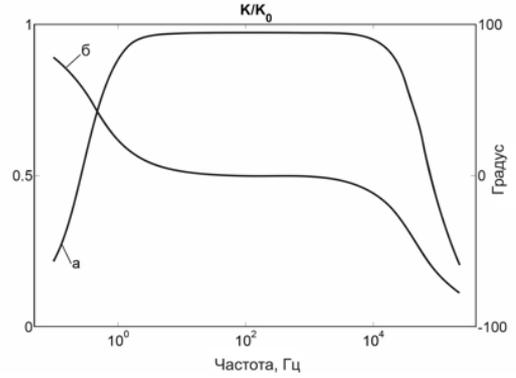


Рис. 2. Нормализованная передаточная характеристика ЩЗЛ: а) модуль $|K/K_0|$; б) фаза $\text{Arg}(K/K_0)$ (в градусах).

приведена на рис. 2, где а – модуль комплексной функции K/K_0 , а б – аргумент K/K_0 в градусах. Для данного конкретного случая принято:

$$Y_a = j\omega C + 0.5B, \quad (15)$$

$$B = R_a / D, \quad (16)$$

$$D = \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12} + j(\omega\tau_1\alpha_{11} + (\omega\tau_2)^{-1})}{1 + 2\alpha_{12} + \alpha_{12}^2 + (\omega\tau_2)^{-2}}, \quad (17)$$

$$K_2 = D / (1 + j\omega\tau_1), \quad (18)$$

где $C = 3.6$ нФ – шунтирующий конденсатор, параллельный измерительному резистору $R = 860$ Ом, $\tau_1 = 1.44 \cdot 10^{-5}$ с, $\tau_2 = 0.36$ с – постоянные времени входных цепей усилителя, $\alpha_{11} = (\tau_1 + \tau_2) / \tau_2$, $\alpha_{12} = \tau_1 / \tau_2$, $R_a = 3.6 \cdot 10^6$ Ом – входное сопротивление усилителя (см. рис. 1).

Полученные выражения позволяют оценить порог чувствительности ЩЗЛ как измерителя ППТ в составе ВЗ. Он определяется соотношением коэффициента $K_0 = SR$ и входного шума усилителя. Для конструкции ВЗ, использованного в эксперименте «Вариант», $S = 77$ см², откуда $K_0 \approx 6.6 \cdot 10^4$ В/(А·см²). Использованный усилитель (ad620) имел спектральную плотность шума около 9 нВ / √ Гц, следовательно, порог чувствительности ЩЗЛ ≈ 0.14 пА / (см² / √ Гц), что соответствует требованию 3 (раздел 1).

Отметим, что рассмотренная конструкция ВЗ позволяет избежать ряда специфических недостатков, присущих первым конструкциям ЩЗЛ. Так, неизбежная разность площадей пластин ЩЗЛ, хотя и приведет к некоторой неопределенности значения величины K_0 , но никак не к ее изменению в процессе эксперимента, так как через обе пластины и измерительный резистор R будет течь один и тот же ток, создающий измеряемое падение напряжения на этом резисторе.

Кроме того, поскольку сопротивление резистора R намного меньше сопротивления плазменного слоя, обе пластины ЩЗЛ будут практически закорочены, т. е. будут находиться под одним и тем же потенциалом. Поэтому влияние таких факторов, как разность работы выхода фотоэлектронов, различие входных параметров усилителя и эффект следа при обтекании ВЗ, будет незначительным. А разность потенциалов между пластинами за счет падения потенциала на резисторе R при прохождении измеряемого тока также

пренебрежимо мала даже для предельно возможного значения ППТ в ионосфере: при $J_{\max} \approx 10^{-8}$ А /см² эта разность составит лишь ≈ 0.7 мВ.

Приведенные положения были экспериментально подтверждены при наземном физическом моделировании [20] и при проведении космического эксперимента «Вариант» на борту КА «Сич-1М» (2004 г.), описанном ниже.

Космический эксперимент «Вариант»

Подтверждение возможности прямых измерений ППТ в ионосферной плазме было одной из основных задач эксперимента «Вариант» на борту украинского спутника «Сич-1М», запущенного 24.12.2004 г. [9]. Как уже упоминалось, из-за сбоя в работе третьей ступени ракеты-носителя вместо запланированной круговой орбиты с высотой 650 км спутник оказался на эллиптической орбите с апогеем ~ 600 км, перигеем ~ 280 км и наклоном 83° . Из-за такого низкого перигея штатные средства ориентации КА не могли работать и, в результате разряда бортовых батарей, в мае 2005 г. спутник прекратил активное существование. Тем не менее, в период летных испытаний удалось провести несколько сеансов связи с комплексом научной аппаратуры (КНА) «Вариант», который передал на Землю достаточно большой объем информации. Ее обработка позволила впервые надежно показать работоспособность ВЗ, включая токовый канал (ЩЗЛ). С этой целью были использованы сигналы электронных вистлеров. Эти сигналы хорошо подходят для верификации работы ВЗ по следующим причинам. Во-первых, они имеют достаточно высокую фазовую скорость: $\omega/k \gg u$, что позволяет пренебречь эффектом Доплера. Во-вторых, достаточно простые дисперсионные соотношения для вистлера с частотой ω позволяют легко оценить волновое число k , для чего необходимые параметры плазмы могут быть взяты из известных моделей ионосферы. С другой стороны, спектральные параметры $\{\omega \bar{k}\}$ могут быть получены через уравнение Максвелла из измеренных величин полей и токов $\{E\omega, B\omega, J\omega\}$, индуцированных вистлером в ионосферной плазме.

На основе этих положений, проведено сравнение параметров вистлера, полученных обоими путями. Близость значений этих величин была бы наилучшим доказательством правильности работы как ВЗ, так и ЩЗЛ.

В качестве примера взят вистлер, зарегистрированный КНА «Вариант» при пролете над грозовым фронтом в районе Африканского Рога (23 марта 2005г., 22:13:35 МВ, широта 13.09° , долгота 48.11° , высота 340 км). Динамические спектры сигналов, полученные по электрическому полю (компонента E_z), магнитному полю (компонента B_x) и по токовому каналу (компонента J_z), приведены на рис. 3, а, а соответствующие волновые формы – на рис. 3, б. При этом амплитуды сигналов, измеренных в момент времени $t=33.7$ с и отфильтрованных на частоте $f=4000$ Гц, составляли: электрическое поле $E_z = 80$ мкВ/м, магнитное поле $B_x = 300$ пТл, плотность

электрического тока $J_z = 30$ пА/см².

Из рис. 3, а можно заключить, что вистлер распространялся квазипродольно, что позволяет принять угол φ между волновым вектором и магнитным полем близким к нулю и, следовательно, $\cos \varphi \approx 1$. Тогда уравнение дисперсии для вистлера при $\omega \ll \omega_c$ может быть записано в виде:

$$\omega = \frac{\omega_c}{\omega_p} c^2 k^2 \cos \varphi \approx \frac{\omega_c}{\omega_p} c^2 k^2. \quad (19)$$

Здесь ω_p – частота Ленгмюра, а ω_c – электронная циклотронная частота. Из модели MSIS-90 взяты значения для данной точки в ионосфере: $\omega_p \approx 3 \cdot 10^7$ рад/с; $\omega_c \approx 5 \cdot 10^6$ рад/с и вычислены значения коэффициента преломления n и длины волны λ для вистлера на выбранной частоте $f = 4$ кГц:

$$n = \frac{ck}{\omega} \approx 85, \quad \lambda = 890 \text{ м.} \quad (20)$$

Теперь найдем те же дисперсионные характеристики из измеренных значений полей и тока. Известно, что продольно распространяющийся вистлер представляет собой волну с правой круговой поляризацией, в которой векторы электрического и магнитного полей и тока вращаются с частотой ω в плоскости, перпендикулярной волновому вектору. Для такой волны соотношения между соответствующими гармониками полей и тока описываются уравнениями Максвелла:

$$\vec{B}_\omega = \frac{1}{c} \vec{n} \times \vec{E}_\omega, \quad (21)$$

$$\vec{J}_\omega = i \epsilon_0 \omega n^2 \vec{E}_\omega, \quad (22)$$

где $\vec{n} = \vec{ck} / \omega$. Подставим в уравнение (21) приведенные выше измеренные значения амплитуд сигналов на частоте $f = 4$ кГц и получим:

$$n = c \frac{B}{E} = 110, \quad \lambda = 660 \text{ м.} \quad (23)$$

Очевидна достаточно хорошая сходимость расчетных (формула 20) и полученных экспериментально (формула 23) значений дисперсионных характеристик волны. Более того, если мы теперь вычислим значение плотности тока из уравнения (22), получим $J = 23$ пА/см², что очень близко к приведенной выше величине $J = 30$ пА/см², измеренной ЩЗЛ.

Приведенные оценки достаточно надежно подтверждают правильность работы как ВЗ, так и его составляющей части – ЩЗЛ.

Выводы

Получение дисперсионных характеристик весьма важно для исследования волновых процессов в космической плазме. Наиболее эффективным методом для этого являются одновременные измерения в одной точке пространства флуктуаций плотности пространственного тока и магнитного поля, сопровождающих эти процессы. В данной работе показано, что новый прибор – волновой зонд – успешно справляется с этой задачей. Проведенный теоретический анализ и наземные испытания в плазменной камере

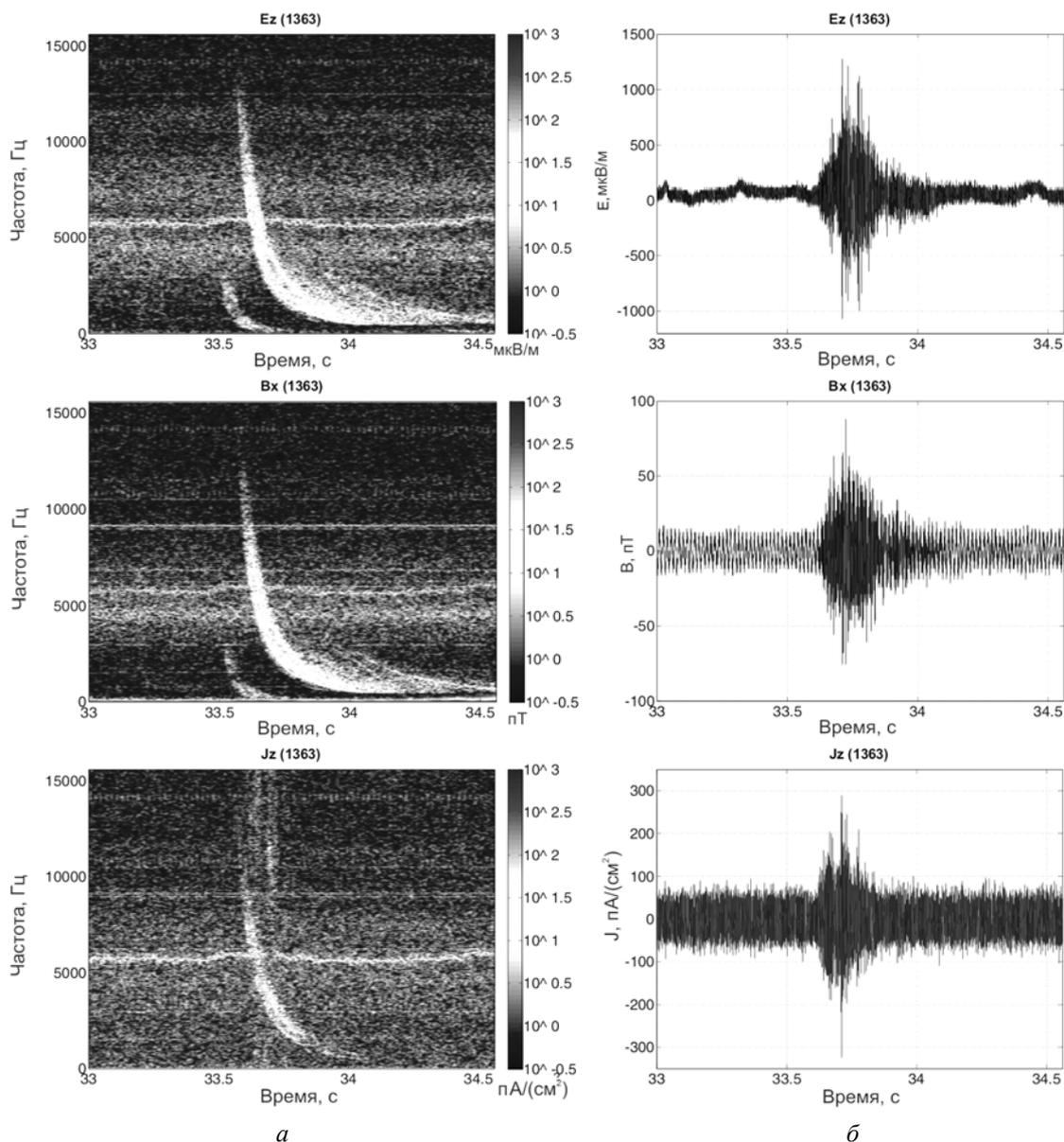


Рис. 3. Динамические спектры (а) и волновые формы (б) измеренных сигналов.

позволили решить сложную научно-техническую задачу создания волнового зонда и, в особенности, согласования входящего в его состав щелевого зонда Ленгмюра со средой. Правильность конструктивных, схмотехнических и методических решений подтверждена при первом же использовании волнового зонда в эксперименте «Вариант», проведенном на борту КА «Сич-1М» (2004 г.). Несмотря на частичную неудачу запуска, обработка поступившей с борта информации позволила впервые в мировой практике космических исследований получить достаточно надежные количественные измерения плотности пространственного тока в ионосферной плазме. При этом совместная обработка этих данных с результатами измерений флуктуаций магнитного поля, выполненных в той же точке пространства тем же волновым зондом, позволила экспериментально получить длину волны и показатель преломления вистлерной волны на борту одного КА и подтвердить их хорошее совпадение с теоретическими оценками.

Можно сделать вывод, что новый комбинированный датчик – волновой зонд – может быть успешно использован для анализа и восстановления спектрального состава исследуемых волновых процессов. Это позволило включить ВЗ в состав КНА перспективных проектов («Чибис», «Обстановка», «Ионосат», «Радиоастрон»).

Авторы считают своим долгом выразить глубокую благодарность С. Климову и Ф. Мозеру за постоянное внимание к работе и практическую поддержку, а также Г. Лизунову и Е. Крючкову за содействие в обработке и интерпретации данных.

Работа выполнена при поддержке контракта с НКАУ № 1-02/03.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bering E.A., Kelley M.C., Moser F.S. Split Langmuir probe measurements of current density and electric fields in an aurora // J. Geophys. Res. 1973. N 78(13). P. 2201–2213.

2. Bering E.A., Kelley M.C., Moser F.S., Fahleson U.V. Theory and operation of the split Langmuir probe // *Planet Space Sci.* 1973. N 21(11). P. 1983–2001.
3. Bering E.A., Moser F.S. A measurement of perpendicular current density in an aurora // *J. Geophys. Res.* 1975. N 80(18). P. 3961–3972.
4. Vaisberg O. On the determination of the spatial scale in the moving reference frame // *Soviet Journal Space Research.* 1985. N 12(6). P. 1241–1243.
5. Petrukovich A.A., Romanov S.A., Klimov S.I. Direct Measurements of AC Plasma Currents in the Outer Magnetosphere // *Measurement Techniques in Space Plasmas: Fields. Geophysical Monograph.* Edited by Robert F. Pfaff, Joseph E. Borovsky & David T. Young. 1998. V. 103. P. 199–204.
6. Grard R.J.L. A new concept for detecting electromagnetic and electrostatic waves in space plasmas // *Planet. Space Sci.* 1976. V. 24. N. 11. P. 1097–1104.
7. Беркман Р.Я., Корепанов В.Е. Бесконтактный первичный измерительный преобразователь напряженности электрического поля // *Всесоюзная конференция по информационно-измерительным системам ИИС-81.* Львов, 1981. С. 77–78.
8. Krasnoselskikh V.V., Natanzon A.M., Reznikov A.E. et al. Current measurements in space plasmas and the problem of separating between spatial and temporal variations in the field of a plane electromagnetic wave // *Adv. Space Res.* 1991. N 11(9). P. 37–40.
9. Korepanov V., Negoda O., Lizunov G. et al. Project VARIANT: current and field measurements on board SICH-1M satellite // *Adv. Space Res.* 2000. N 25(7–8). P. 1337–1342.
10. Korepanov V. and Variant team. Experiment VARIANT onboard Ukrainian satellite SICH-1M – first results // 10th Scientific Assembly of the IAGA, Toulouse, France, July 18–29. 2005. IAGA2005–A–00838 (публикация на CD).
11. Vaisberg O., Klimov S., Korepanov V. Current density measurements in the shock front by means of Splitting Langmuir Probe // *Soviet Journal Space Research.* 1989. N 27(3). P. 623–627.
12. Savin S. et al. Magnetosheath – cusp interface. *Annales Geophysicae.* 2004. N 22. P. 183–212.
13. Korepanov V., Dudkin F. Combined wave probe for space plasma investigation – theory and first application results // XXVth General Assembly of the u.r.s.i., Lille, France, August 28 – September 5, 1996. 500. p.
14. Korepanov V., Dudkin F. Comparative analysis of current density meters operating in space plasma // *Adv. Space Res.* 1999. V. 23. N 8. P. 1541–1544.
15. Korepanov V., Berkman R. New approach to the exact design of low noise search-coil magnetometers // *New measurements - challenges and visions: XIV IMEKO Word Congress, Tampere, Finland, 1997. V. IVA. Topic 4. C. 103–108.*
16. Wait J.R. *Geoelectromagnetism.* New York: Academic Press, 1982.
17. Crawford F.W., Mlodnosky R.F. Langmuir probe response to periodic waveforms // *J. Geophys. Res.* 1964. 69(13). P. 2765–2773.
18. Schwar J.D., M. J.R. *Electrical probes for plasma diagnostics* // London: ILIFE Books, 1970.
19. Корепанов В.Е., Ивченко В.Н., Лизунов Г.В., Федоров О.П., Дудкин Ф.Л., Попель А.М. «вариант» – первый международный научный эксперимент на борту украинского спутника. «Космічна наука і технологія!». 2007. Т. 13. № 4. С. 3–9 (на укр. языке).
20. Корепанов В.Е., Дудкин Ф.Л., Марусенков А.А., Леонов С.М. Исследование датчиков плотности тока космической плазмы в лабораторных условиях // *Пятая украинская конференция по космическим исследованиям, Евпатория, Крым, 4–11 сентября, 2005. С. 123 (на укр. языке).*

Львовский центр Института космических исследований, Львов, Украина