

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

# КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ



---

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА

1982

метра ( $U_{F1}$ ,  $U_{F2}$ ,  $A_{1,2}$ ,  $A_2$ ), всего  
измерения РС МП возвращает  
ное состояние и останавливается.

с в зависимости от числа прибли-  
стижки или температуры  $T_e$ .

, передаваемых по каналам ЕТМС,  
конечного физического пара-  
шивает» ячейки с соответствующи-  
при помощи заполненной в ПЗУ  
льной подпрограмме, также разме-  
зательное значение  $T_e$  и передает  
ЕТМС.

бора (24 с) первые две секунды  
ыдача сигналов калибровок, слу-  
на обе системы телеметрии. Ос-  
тся измерение  $T_e$  и передача этих  
ия  $T_e$  МП передает запомненные  
одни аналоговый) канала РТС.  
го цифрового канала принадлежат  
шиеся четыре бита используются  
единены параллельно, и, так как  
ловине кадра, а другой во второй,  
исходит не только синхроимпуль-  
но и вспомогательными импуль-

Таким образом, восемь проводов  
оговый канал передает усиление  
щью ЦАП. Передача информации  
зводится со скоростью 446 бит/с.  
не только данные измерения РС,  
ла МП еще опрашивает: текущие  
ленное истинное значение элект-  
слова текста программы микро-  
редается в 8 циклах. Всего полу-  
Блок передачи начинается двумя  
о режиме работы прибора, закан-  
опять двумя синхрословами.

работы МП. Одной из важнейших  
граммы измерения, обработки дан-  
бе системы телеметрии. Благодаря  
других мини-ЭВМ оказалось воз-  
амми отработать на этих машинах,  
оверка была проведена на собран-  
программы вместе с таблицами по-  
лов ПЗУ обеспечено только после-  
ей программы на подпрограммы,  
кратное обращение.

ПЗУ прибора КМ-3, проверялись  
редстартовых испытаний при по-  
О фирмы «Интерсепт» [7], размещен-

ных на двух небольших платах, микро-ЭВМ использовалась для  
контроля работы МП и для дешифровки и печати таблиц данных  
части информации ЕТМС во время испытаний, а также на первом  
этапе работы спутника ИК-19 после запуска в реальном масштабе  
времени.

Результаты, полученные за первый год работы спутника ИК-19  
подтвердили работоспособность и эффективность описанной выш-  
системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Intersil IM 6100 CMOS 12 bit microprocessor. Cupertino: Intersil, 1976.
2. PDP-B/E, PDP-8/M, PDP-B/F small computer handbook. Maynard: Digital Equipment Corp., 1973.
3. The TTL data book for desing engineers. Freising: Texas Instruments Deutschland, 1978.
4. Таблица аналогов интегральных схем СССР и зарубежных фирм. М.: В/О «Электроноргтехника», 1978.
5. Gasdichte Nickel-Cadmium Akkumulatoren, Rundzellen mit Sinterelektroden, Prospekt 40396, Varta AG. Hannover.
6. Кубат К., Клас Я., Шмлауэр Я., Афонин В. В. Прибор КМ-3 для измерения электронной температуры и распределения скоростей тепловых электронов. — В кн.: Аппаратура для исследования внешней ионосферы. М.: ИЗМИРАН, 1980, с. 120.
7. Intercept Jr. IM 6100 microprocessor tutorial systems. Cupertino: Intersil, 1977.

УДК 533.51.535:621.38

#### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ МЕТОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЗОНДА

Ю. Д. Крислов, В. Г. Пядышев, В. В. Афонин,  
В. И. Старцев

Для определения температуры электронов космической плазмы  
 $T_e$  применяется метод, основанный на измерении амплитуды  $U_{TE}$   
видеоимпульсов, возникающих в результате смещения собствен-  
ного потенциала изолированного зонда при подаче на него радио-  
импульсов с гармоническим заполнением [1, 2].

Статическая погрешность измерения  $T_e$ , которая зависит  
в основном от стабильности амплитуды гармонического напряже-  
ния и от постоянства параметров измерителя  $U_{TE}$ , рассмотрена  
в [2, 3]. В данной работе исследованы возможности уменьшения  
динамической погрешности, которая определяется следующими  
факторами. Во-первых, сопротивление цепи между зондом и кор-  
пусом космического аппарата имеет активно-емкостный характер  
и постоянная времени  $\tau$  этой цепи вызывает искажения фронтов  
видеоимпульсов [3]. Во-вторых, собственный потенциал зонда  
относительно корпуса космического аппарата  $U_{с06}$  изменяется

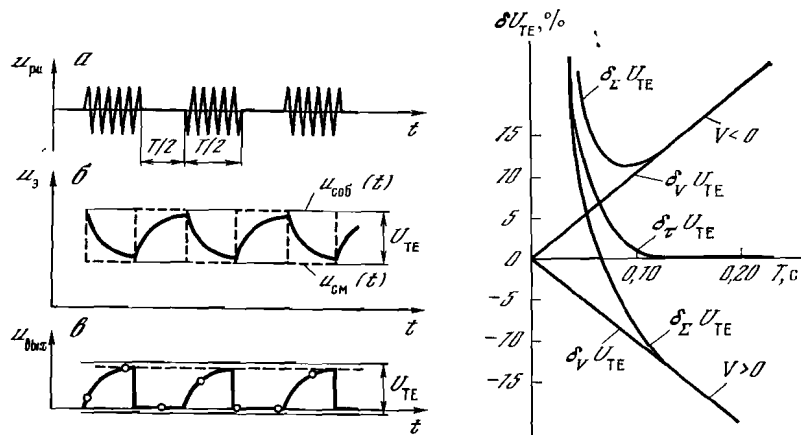


Рис. 1. Временные диаграммы напряжений радиоимпульсов (а) на зонде (б), на выходе измерителя (в)

Рис. 2. Зависимости относительных погрешностей измерения  $U_{TE}$  от  $T$

во времени, что вызывает искажения вершин видеоимпульсов. Для определения тонкой структуры плазмы требуется повысить частоту измерения  $T_e$ , поэтому влияние этих факторов необходимо свести к минимуму.

Рассмотрим погрешность измерения  $U_{TE}$ , вызываемую искажением фронтов видеоимпульсов, наблюдаемых на зонде при подаче на него напряжения радиоимпульсов  $u_{ри}$  с периодом следования  $T$  и с огибающей формы меандра (рис. 1, а). На рис. 1, б штриховой линией представлена временная диаграмма напряжения на зонде  $u_з(t)$  для случая  $T \gg \tau$ , а сплошной линией — для случая  $T \approx \tau$ . При определении  $U_{TE}$  путем вычитания текущего смещенного потенциала  $u_{см}(t)$  из значения  $u_{собр}$ , измеренного непосредственно перед подачей на зонд радиоимпульса [1, 2], напряжение на выходе измерителя  $u_{вых}(t)$  представляет собой видеоимпульсы с затянутыми передними фронтами (рис. 1, в). При подаче этого напряжения на асинхронно опрашиваемый телеметрический канал на Землю передаются значения  $u_{вых}(t)$ , отмеченные точками на рис. 1, в. Очевидно, что это сопровождается потерей информации и значительными отклонениями измеренного сигнала от величины  $U_{TE}$ .

Для повышения информативности и точности измерений необходимо перед подачей на телеметрию преобразовать импульсы  $u_{вых}(t)$  (рис. 1, в) в постоянное напряжение, равное пиковому значению (штриховая линия на рис. 1, в). Можно показать, что в этом случае относительное отклонение  $\delta_T U_{TE}$  пикового значения амплитуды импульсов от истинного значения  $U_{TE}$  определяется выражением

$$\delta_T U_{TE} = 2 \exp(-T/2\tau). \quad (1)$$

Зависим  
из кото  
до  $6 \delta_T U$   
Знач  
аппарат  
 $T < \tau$ .  
возмо  
экстрап  
чек врем

$U_{TE}$

где  $U_{н1}$   
 $T/4$  от  
и  $U_{с2}$  —

Если  
 $U_{н1} = U$

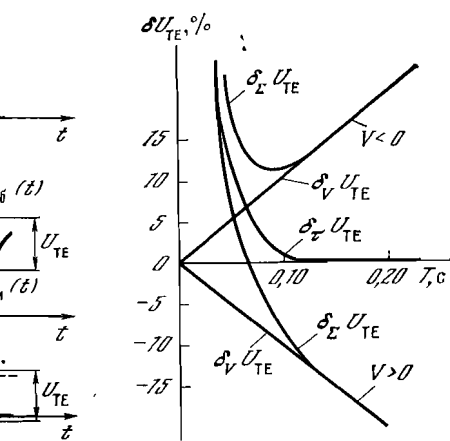
$U_{TE}$

На р  
погреш  
измерен  
= 0,5;  
 $\delta U_2$  на  
 $\delta U_1 = \delta$   
и не зав  
симосте  
стей инт  
 $U_2$  и  $U_1$   
ние  $\delta t_1$   
при  $\delta t_1$

Вмес  
трех точ  
мическу  
стродей  
ны. Реа  
 $\delta t_1, \delta t_2$ .

Полу  
= const  
ную изм  
дом при  
парата,  
достига

На р  
при усл  
скорост  
При это  
составл



напряжений радиоимпульсов (а)  
для (б)  
погрешностей измерения  $U_{TE}$  от  $T$

кажения вершин видеоимпульсов. Для  
уры плазмы требуется повысить час-  
у влияние этих факторов необходимо

ь измерения  $U_{TE}$ , вызываемую искаже-  
ов, наблюдаемых на зонде при подаче  
импульсов  $u_{ри}$  с периодом следования  $T$   
дра (рис. 1, а). На рис. 1, б штриховой  
нная диаграмма напряжения на зонде  
плошной линией — для случая  $T \approx \tau$ .  
ем вычитания текущего смещенного  
ения  $u_{соб}$ , измеренного непосредствен-  
радиоимпульса [1, 2], напряжение на  
представляет собой видеоимпульсы  
фронтами (рис. 1, в). При подаче этого  
опрашиваемый телеметрический канал  
ения  $u_{вых}(t)$ , отмеченные точками на  
б сопровождается потерей информации  
ниями измеренного сигнала от вели-

мативности и точности измерений не-  
телеметрию преобразовать импульсы  
янное напряжение, равное пиковому  
я на рис. 1, в). Можно показать, что  
е отклонение  $\delta_\tau U_{TE}$  пикового значения  
стинного значения  $U_{TE}$  определяется

(1)

Зависимость  $\delta_\tau U_{TE}$  от  $T$  для  $\tau = 0,01$  с представлена на рис. 2, из которого следует, что при уменьшении отношения  $T/\tau$  с 9,2 до 6  $\delta_\tau U_{TE}$  возрастает с 2 до 10%.

Значение  $\tau$  может изменяться вдоль траектории космического аппарата в пределах  $10^{-5}$ — $10^{-1}$  с [3]. Рассмотрим случай, когда  $T < \tau$ . При этом по амплитуде напряжения на зонде вообще невозможно определить  $U_{TE}$ . Эта величина оценивается при помощи экстраполяции фронтов импульсов по координатам отдельных точек временной диаграммы. Можно показать, что

$$U_{TE} = U_{н1}^2 / (2U_{н1} - U_{н2}) + U_{с1}^2 / (2U_{с1} - U_{с2}) - U_{н2}, \quad (2)$$

где  $U_{н1}$  и  $U_{с1}$  — нарастание и спад напряжений на зонде за время  $T/4$  от начала нарастания и начала спада соответственно;  $U_{н2}$  и  $U_{с2}$  — то же, но за время  $T/2$ .

Если постоянные времени нарастания и спада равны, то  $U_{н1} = U_{с1} = U_1$ ,  $U_{н2} = U_{с2} = U_2$  и выражение (2) упрощается:

$$U_{TE} = 2U_1^2 / (2U_1 - U_2) - U_2. \quad (3)$$

На рис. 3 представлены графики зависимостей относительной погрешности  $\delta_\tau U_{TE}$  от  $\delta U_1$  и  $\delta U_2$  — относительных погрешностей измерения  $U_1$  (а) и  $U_2$  (б) соответственно для соотношений  $T/\tau = 0,5; 1; 2; 4$ . Видно, что при уменьшении  $T/\tau$  влияние  $\delta U_1$  и  $\delta U_2$  на  $\delta_\tau U_{TE}$  возрастает. Однако нетрудно показать, что при  $\delta U_1 = \delta U_2$  это влияние минимально. Здесь  $\delta_\tau U_{TE} = \delta U_1 = \delta U_2$  и не зависит от  $T/\tau$ . На рис. 3 представлены также графики зависимостей  $\delta_\tau U_{TE}$  от  $\delta t_1$  (а) и  $\delta t_2$  (б) — относительных нестабильностей интервалов времени между соседними замерами  $U_1$  и  $U_2$  (б),  $U_2$  и  $U_1$  (в) соответственно. Видно, что при уменьшении  $T/\tau$  влияние  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$  на  $\delta_\tau U_{TE}$  также возрастает. Это влияние минимально при  $\delta t_1 = \delta t_2$ .

Вместе с тем из рис. 3 следует, что при определении  $U_{TE}$  по трем точкам фронтов можно получить сколь угодно малую динамическую погрешность для любого  $T/\tau$ , следовательно, здесь быстроедействие и точность измерения принципиально не ограничены. Реальные ограничения налагают погрешности:  $\delta U_1$ ,  $\delta U_2$ ,  $\delta t_1$ ,  $\delta t_2$ .

Полученные выше соотношения справедливы при  $u_{соб}(t) = \text{const}$ . Рассмотрим погрешность измерения  $U_{TE}$ , обусловленную изменениями  $u_{соб}(t)$ . Указанные изменения вызываются рядом причин: изменением освещенности зонда и космического аппарата, работой различных бортовых устройств и др. Они могут достигать нескольких вольт в секунду.

На рис. 4 представлены временные диаграммы  $u_3(t)$  и  $u_{вых}(t)$  при условиях:  $U_{TE}(t) = \text{const}$ ,  $u_{соб}(t)$  изменяется линейно со скоростью  $V = du_{соб}(t)/dt = \text{const} \neq 0$ , соотношение  $T/\tau \geq 10$ . При этом фронты импульсов не искажены и ранее рассмотренная составляющая погрешности  $\delta_\tau U_{TE}$  практически исключена.

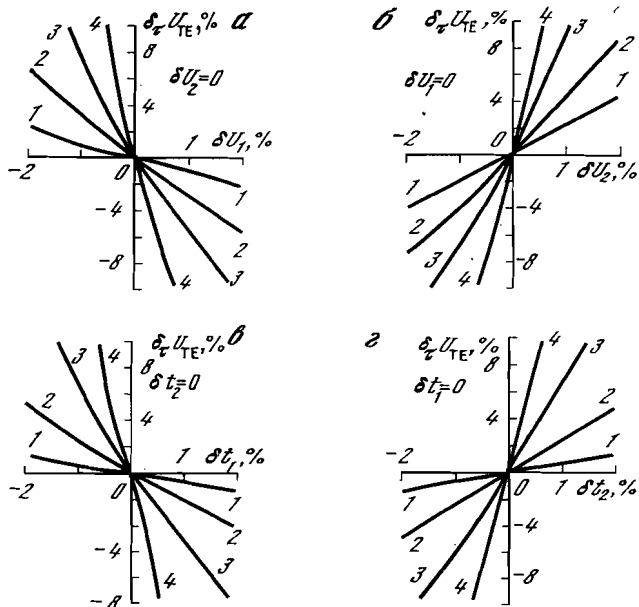


Рис. 3. Зависимости относительной погрешности измерения  $U_{TE}$  от относительных погрешностей измерения  $U_1$  (а) и  $U_2$  (б), а также от относительных нестабильностей интервалов времени между замерами  $U_1$  и  $U_2$  (в) и  $U_2$  и  $U_1^1$  (г);  
 1 —  $T/\tau = 4$ , 2 —  $T/\tau = 2$ ,  
 3 —  $T/\tau = 1,74$  —  $T/\tau = 0,5$ ;  
 а, б —  $\delta t_1 = \delta t_2 = 0$ ; в, г —  $\delta U_1 = \delta U_2 = 0$

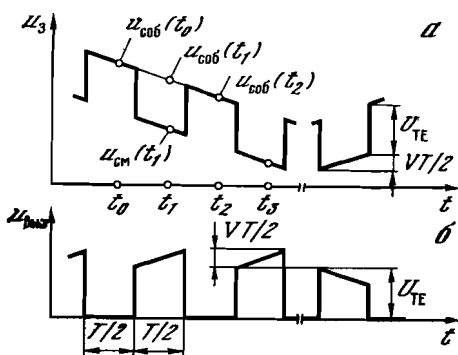


Рис. 4. Временные диаграммы при  $V \neq 0$ : напряжение на зонде (а) и выходе измерителя (б)

Искажение вершины импульса определяется изменением его амплитуды  $U(t)$  за время его длительности  $U(t) = U_{TE} + Vt$ , которая к моменту окончания импульса достигает величины  $U(T/2) = U_{TE} + VT/2$ . Вызванная этим искажением максимальная относительная погрешность  $\delta_V U_{TE}$  определяется по формуле

$$\delta_V U_{TE} = VT/2U_{TE}. \quad (4)$$

Подобные искажения вершин импульсов получены в эксперименте [1, 4]. На рис. 2 представлена зависимость  $\delta_V U_{TE}$  от  $T$  при  $U_{TE} = 100$  мВ,  $V = \pm 200$  мВ/с.

Описанные выше погрешности  $\delta_t U_{TE}$  и  $\delta_V U_{TE}$  влияют на результат измерения  $U_{TE}$  независимо друг от друга, поэтому общая

погрешность  
 $\delta_2 U_{TE} =$   
 Зависит  
 при уменьшении  
 Из характера  
 видно, что  
 чин  $\tau$ ,  $V$  и  
 рующее с  
 грешность  
 Погрешность  
 если при  
 из собствен  
 времени  $t_1$   
 зонда изме  
 что приме  
 санного в  
 $\delta_V U_{TE}$ . В  
 с помощью  
 ным в дру

$u_{собр}(t_1)$   
 Здесь  $u_{собр}$   
 отстоящие  
 и  $t_2$ . При  
 $\delta_V U_{TE}$ , от  
 $u_{собр}(t_2)$  и  
 Строго  
 ния  $u_{собр}(t_1)$   
 поляция. С  
 трудности  
 радиоимпу

Выводы  
 результаты  
 высокочаст  
 этой погреш  
 нением его  
 ности след  
 радиоимпу  
 средством  
 сов; 3) ум  
 зонда погр

ЛИТЕРАТУРА  
 1. Hiraо K sphere.  
 2. Афонин слутник с. 254—

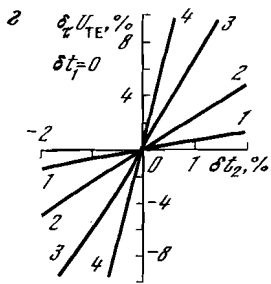
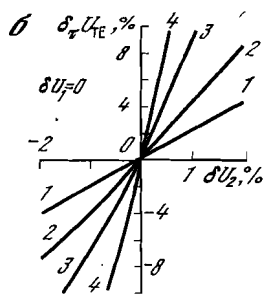


Рис. 3. Зависимости относительной погрешности измерения  $U_{TE}$  от относительных погрешностей измерения  $U_1$  (а) и  $U_2$  (б), а также от относительных нестабильностей интервалов времени между замерами  $U_1$  и  $U_2$  (в) и  $U_2$  и  $U_1^1$  (г);

1 —  $T/\tau = 4$ , 2 —  $T/\tau = 2$ ,  
3 —  $T/\tau = 1,74$  —  $T/\tau = 0,5$ ;  
а, б —  $\delta t_1 = \delta t_2 = 0$ ; в, г —  $\delta U_1 = \delta U_2 = 0$

Рис. 4. Временные диаграммы при  $V \neq 0$ : напряжение на зонде (а) и выходе измерителя (б)

пульса определяется изменением его длительности  $U(t) = U_{TE} + Vt$ , когда импульс достигает величины, связанная этим искажением максимальная погрешность  $\delta_V U_{TE}$  определяется по формуле (4)

импульсов получены в эксперименте и зависимость  $\delta_V U_{TE}$  от  $T$  при  $U_{TE} =$  постоянности  $\delta_t U_{TE}$  и  $\delta_V U_{TE}$  влияют на результаты друг от друга, поэтому общая

погрешность  $\delta_{\Sigma} U_{TE}$  с учетом (1) и (4) определяется их суммой:

$$\delta_{\Sigma} U_{TE} = \delta_t U_{TE} + \delta_V U_{TE} = 2 \exp(-T/2\tau) + VT/2U_{TE}. \quad (5)$$

Зависимости  $\delta_t U_{TE}$  и  $\delta_V U_{TE}$  от  $T$  (см. рис. 2) показывают, что при уменьшении  $T$  уменьшается  $\delta_V U_{TE}$ , но возрастает  $\delta_t U_{TE}$ . Из характера кривой  $\delta_{\Sigma} U_{TE}$ , также представленной на рис. 2, видно, что при известных статистических характеристиках величин  $\tau$ ,  $V$  и  $U_{TE}$  существует оптимальное значение  $T$ , минимизирующее среднюю (по ансамблю измерений) относительную погрешность.

Погрешность  $\delta_V U_{TE}$  можно было бы значительно снизить, если при определении  $U_{TE}$  вычитать смещенный потенциал  $u_{см}(t_1)$  из собственного потенциала  $u_{соб}(t_1)$ , измеренного в тот же момент времени  $t_1$ , что и  $u_{см}$  (рис. 4, а). При использовании одиночного зонда измерить  $u_{соб}(t_1)$  невозможно. Эксперименты показывают, что применение для этих целей дифференциального зонда, описанного в [4—6], также не всегда позволяет эффективно снизить  $\delta_V U_{TE}$ . Вместе с тем при  $V = \text{const}$   $u_{соб}(t_1)$  можно определить с помощью линейной интерполяции по значениям  $u_{соб}$ , измеренным в другие моменты времени:

$$u_{соб}(t_1) = [u_{соб}(t_2) - u_{соб}(t_0)]/2.$$

Здесь  $u_{соб}(t_0)$  и  $u_{соб}(t_2)$  — значения  $u_{соб}$ , измеренные в равноотстоящие от  $t_1$  периодически следующие моменты замеров  $t_0$  и  $t_2$ . При этом ошибка нахождения  $u_{соб}(t_1)$ , а следовательно, и  $\delta_V U_{TE}$ , определяется только погрешностью измерения  $u_{соб}(t_0)$ ,  $u_{соб}(t_2)$  и реализации операции вычитания.

Строго говоря, изменение  $u_{соб}(t)$  нелинейно, и для определения  $u_{соб}(t_1)$  в принципе может применяться более точная интерполяция. Однако реализация ее на борту представляет некоторые трудности. Вместе с тем изменения  $u_{соб}(t)$  за период следования радиоимпульсов  $T$  близки к линейным.

**Выводы.** Динамическая погрешность существенно влияет на результаты измерения температуры электронов плазмы методом высокочастотного зонда. Основной вклад вносят составляющие этой погрешности, обусловленные инерционностью зонда и изменением его потенциала. Пути уменьшения динамической погрешности следующие: 1) оптимальный выбор периода следования радиоимпульсов, 2) уменьшение влияния инерционности зонда посредством экстраполяции амплитуды протектированных импульсов; 3) уменьшение влияния изменений собственного потенциала зонда посредством интерполяции его значений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hiraо K. Layer structure in the electron temperature profile in the ionosphere. — J. Geomagnet. and Geoelectr., 1966, vol. 18, N 3, p. 333—341.
2. Афонин В. В. и др. Исследования ионосферы, проведенные при помощи спутника «Интеркосмос-2». — Космич. исслед., 1973, т. 11, вып. 2, с. 254—265.

3. Пядышев В. Г. и др. Пути повышения точности измерений температуры электронов в ионосфере методом высокочастотного зонда.— Радиотехника, 1978, т. 33, № 4, с. 74—75.
4. Hirao K., Oyama K. An improved type of electron temperature probe.— J. Geomagnet. and Geoelectr., 1970, vol. 22, N 4, p. 393—402.
5. Hirao K., Oyama K. Electron temperature observed with the langmuir probe and electron temperature probe.— J. Geomagnet. and Geoelectr., 1971, vol. 23, N 2, p. 161—167.
6. Oyama K., Hirao K. Electron temperature probe experiments on the satellite «Taiyo».— J. Geomagnet. and Geoelectr., 1975, vol. 27, p. 321—330.

УДК 621.382.2

### ПРИБОР ДЛЯ ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИОНОСФЕРЕ

В. Марков, В. Генов, Хр. Близнаков

Прибор основан на модифицированном методе зонда Ленгмюра, впервые опубликованном в работе [1]. Исследование вольт-амперных характеристик проводится сравнением дифференциальных токов двух идентичных зондов.

Несложные теоретические выкладки дают выражение для величины отношения дифференциальных электронных зондовых токов в области торможения электронов, которое имеет следующий вид:

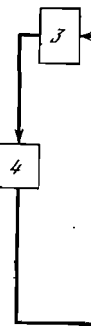
$$\left| \frac{dI_1}{dI_2} \right| dv = \exp \left| e | v_1 - v_2 | / kT \right|, \quad (1)$$

где  $I_1 (I_2)$  и  $v_1 (v_2)$  — ток и потенциал первого (второго) зонда;  $e$  — заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — электронная температура. Из выражения (1) видно, что это отношение зависит от электронной температуры и напряжения между двумя зондами. Положим,

$$\ln \left| \frac{dI_1}{dI_2} \right| dv = e | v_1 - v_2 | / kT = \ln 2, \quad T = e | v_1 - v_2 | / (k \ln 2) = k_1 \Delta v k, \quad (2)$$

где  $\Delta v = v_1 - v_2$  (В),  $k_1 = e/k$ .

Выражение (2) показывает, если сконструировать систему таким образом, чтобы отношение дифференциальных зондовых токов поддерживалось постоянным, примерно  $\left| \frac{dI_1}{dI_2} \right| dv = 2$ , при помощи изменения измеряемого напряжения  $\Delta v$  до достижения заданного отношения токов, то возможно определить непосредственно электронную температуру. Для создания такой системы необходимо непрерывно измерять производные вольт-амперных характеристик. Если на пилообразное напряжение развертки накладывается синусоидальное напряжение небольшой амплитуды, то



для зонд  
следующ

$I_e [v_e$

+

×

Первая п  
вого то  
порядка.  
( $a = 20 \cdot$   
 $a^3/8 = 1$   
дает инф  
с большо  
мерение

При п  
ды подак  
ниже пл  
шой ампл  
дывается  
ные так  
Номинал  
динамиче  
температ  
 $10^3 - 10^5$   
к диффе  
циентом  
вой филь  
Фильтры  
вблизи п  
синусоид  
ность из