

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р

препринт 321

И.С.Фишман

ПРОСТЫЕ СВЧ КОРРЕЛОМЕТРЫ

НОВОСИБИРСК

1969

И.С. Фишман

ПРОСТЫЕ СВЧ КОРРЕЛОМЕТРЫ

АННОТАЦИЯ

Описываются два простых сверхвысокочастотных широкополосных коррелометра, позволяющие измерять авто и взаимные корреляционные функции шумовых сигналов в диапазонах частот 20 - 1000 МГц и 900 - 3500 МГц. Чувствительность коррелометров при использовании в качестве регистрирующего прибора фотогальванометра типа Ф-18 не хуже 1 мв. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики не хуже 6 дБ.

Коррелометры использовались для измерения пространственных и временных характеристик спектров колебаний плазмы.

$$\varphi(\vec{r}, t) \varphi(\vec{r}, t + \tau) \quad (4)$$

Пространственные и временные корреляционные функции случайного процесса, как известно [1], позволяют определять частотный спектр $S(\omega)$ и "обновленный" спектр $S(\kappa)$ колебаний:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega\tau} \rho(\tau) d\tau$$

Для исследования временных и пространственных характеристик высокочастотных электрических (и не только электрических) флуктуаций применяется корреляционный анализ, измерение корреляционных функций. Он позволяет определять коэффициенты корреляции в тех случаях, когда непосредственное исследование сигнала оказывается затруднительным или громоздким.

Для случайного процесса $\overline{\varphi(\vec{z}, t)}$ принято называть автокорреляционной функцией (АКФ) величину

$$\rho(\tau) = \overline{\varphi(\vec{z}, t) \varphi(\vec{z}, t + \tau)} = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(\vec{z}, t) \varphi(\vec{z}, t + \tau) dt \quad (1)$$

Величину

$$\rho(\vec{z}) = \overline{\varphi(\vec{z}, t) \varphi(\vec{z} + \vec{z}_1, t)} \quad (2)$$

называют пространственной корреляционной функцией (ПКФ).

Величина

$$\rho(\vec{z}, \tau) = \overline{\varphi(\vec{z}, t) \varphi(\vec{z} + \vec{z}_1, t + \tau)} \quad (3)$$

- пространственно-временная корреляционная функция (ПВКФ).

Для двух различных процессов взаимная корреляционная функция (ВКФ) есть

$$\overline{\varphi(\vec{z}, t) \psi(\vec{z}, t + \tau)} \quad (4)$$

Пространственные и временные корреляционные функции случайного процесса, как известно [1], позволяют определить частот-

ный $S(\omega)$ и "волновой" $S(k)$ спектры колебаний:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega\tau} \rho(\tau) d\tau$$

$$S(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} \rho(z) dz \quad (5)$$

Пространственно-временная корреляционная функция даёт возможность получить полный спектр мощности $S(\omega, k)$ колебаний:

$$S(\omega, k) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i(kz - \omega\tau)} \rho(z, \tau) dz d\tau \quad (6)$$

В данной статье описываются два простых сверхвысокочастотных широкополосных коррелометра, названные автором сшк-1 (20 - 1000 МГц) и сшк-2 (900 - 3500 МГц), позволяющие измерять АКФ, ПКФ, ПВКФ и ВКФ. Прибор, выполняющий операции (1) - (4) должен включить в себя умножитель, линию задержки и интегратор - усреднитель. Два сигнала (в случае измерения ВКФ) подаются на входы умножителя. Один из них подается через линию задержки, другой непосредственно. Линия задержки переменная. С выхода умножителя снимается пропорциональный произведению сигнал, который интегрируется и усредняется.

Умножитель

В работе /2/ описан умножитель, выполненный по схеме несбалансированного моста на трех высокочастотных диодах. Фактически операцию умножения осуществляет только один из трех диодов. В работе /3/ для измерения использовался однодиодный умножитель, работающий по схеме суммирования на детекторе с характеристикой, аппроксимированной квадратичной параболой.

В настоящей работе умножитель (рис.1) выполнен по схеме вычитания двух сигналов на диоде, характеристика которого аппроксимирована экспоненциальной функцией вида

$$i = A(e^{\delta V} - 1) \quad (7)$$

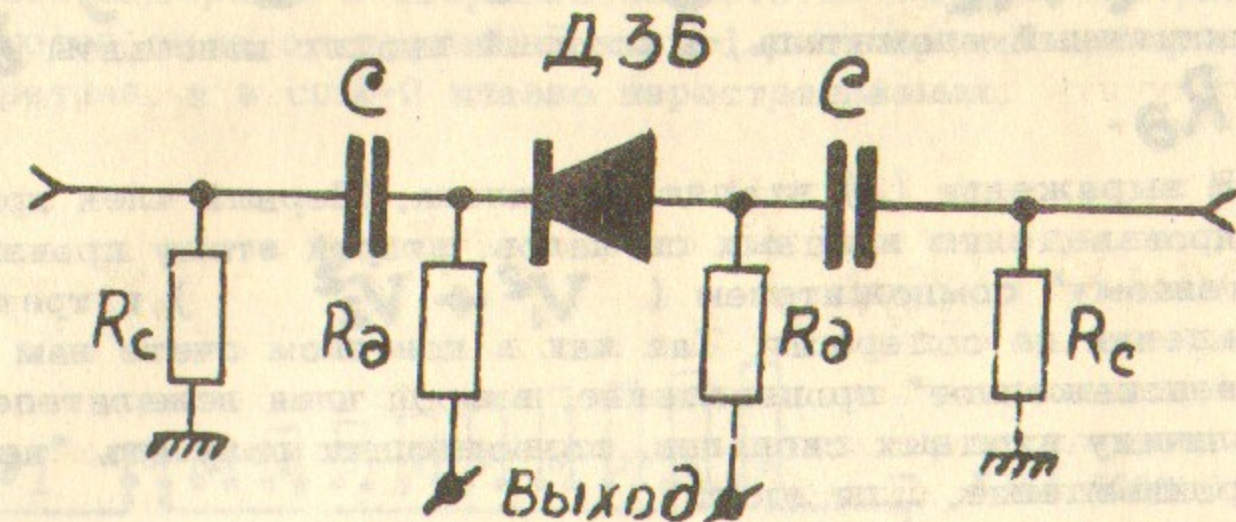


Рис.1. Принципиальная схема умножителя

A и δ константы, характеризующие параметры диода.

V - приложенное к диоду мгновенное напряжение.

Для нашего случая $V = V_1 - V_2$. Здесь V_1 и V_2 мгновенные значения амплитуды двух высокочастотных сигналов (задержанного во времени или пространстве и прямого). Тогда через диод протекает ток

$$i = A(e^{\delta(V_1 - V_2)} - 1) \quad (8)$$

Для определения тока i_0 , протекающего на измерительном сопротивлении (R вход измерительного прибора) экспонента (8)

раскладывается в ряд. Ограничившись первыми четырьмя членами разложения и пренебрегая нечетными степенями (они в дальнейшем выпали бы при интегрировании) получим выражение для тока

i_0 .

$$i_0 = K \left\{ V_1 V_2 \left[1 + \frac{\gamma^2 (V_1^2 + V_2^2)}{6} \right] - \frac{V_1^2 + V_2^2}{2} \right\} \quad (9)$$

K - постоянный множитель, в который входят константы γ , A , R_c , R_0 .

В выражение (9) входят три члена. Первый член пропорционален произведению входных сигналов, второй этому произведению, "искаженному" сомножителем ($V_1^2 + V_2^2$) и третий член произведения не содержит. Так как в конечном счете нам требуется "неискаженное" произведение, второй член нежелателен. Оценим величину входных сигналов, позволяющих получать "неискаженное" произведение. Для этого

$$1 > \frac{\gamma^2 (V_1^2 + V_2^2)}{6} \quad (10)$$

Пусть $V_1 = V_2$ тогда $V < \sqrt{3}/\gamma$. Для применяемого СВЧ диода типа ДЗБ $\gamma = 17$ 1/в. Следовательно

$$V < 1/10 \text{ в} \quad (11)$$

Третий член создаёт постоянное смещение, не изменяющее вида корреляционной функции. Нетрудно заметить, что величина этого смещения равна $-1/2$ амплитуды корреляционной функции, что подтвердилось при экспериментах.

Конструктивно умножители в сшк-1 и сшк-2 немного отличаются. В частности в сшк-2 согласующее сопротивление R_c отсутствует, так как умножитель нагружен на согласованную по плосковую линию с помощью скользящих контактов. Величина безиндуктивной клиновидной ёмкости C в сшк-1 - 150 п, а в сшк-2 - 5,1 п.

Линия задержки

Линии задержки в сверхвысокочастотных коррелометрах сильно отличаются одна от другой. В сшк-1 регулировка задержки линии дискретная, а в сшк-2 плавно перестраиваемая.

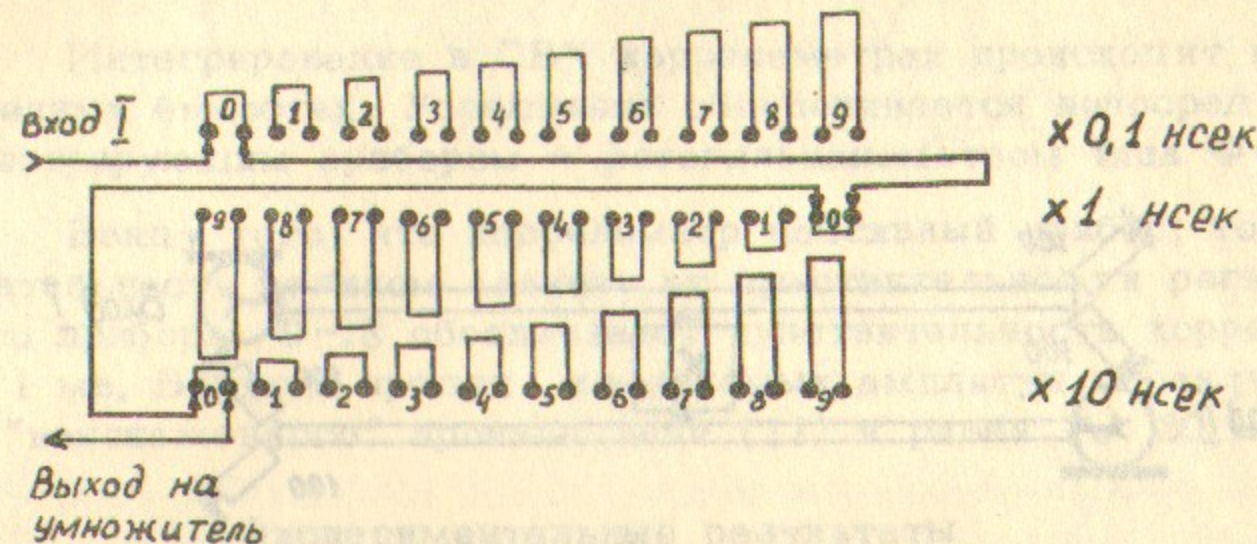


Рис.2. Линия задержки сшк-1

Линия задержки сшк-1 выполнена из отрезков коаксиального кабеля (рис.2). Подключение соответствующего отрезка осуществляется с помощью коаксиального переключателя. Коэффициент стоячей волны линии задержки не хуже 1,3 в диапазоне рабочих частот. Линия задержки сконфигурована из 3-х коаксиальных декадных переключателей, позволяющих получать задержки соответственно 0 - 0,9 нсек через 0,1 нсек; 0 - 9 нсек через 1 нсек и 0 - 90 нсек через 10 нсек. Включенные последовательно линии позволяют получать задержки с интервалом 0,1 нсек вплоть до 99,9 нсек. Для компенсации вносимой добавочной задержки (перемычки, подводящие кабели) длина кабеля, подводящего сигнал с прямого плеча, подобрана строго калиброванной.

Линия задержки сшк-2 представляет собой две расположенные параллельно согласованные полосковые линии (рис.3). Полосковые линии выполнены из фольгированного армированного фторопласта ФАФ-4 и рассчитаны на волновое сопротивление 50 ом /4/. Каждая полосковая линия с одного конца при помощи диафрагмы согласована с коаксиальным разъёмом, а с другого нагружена на

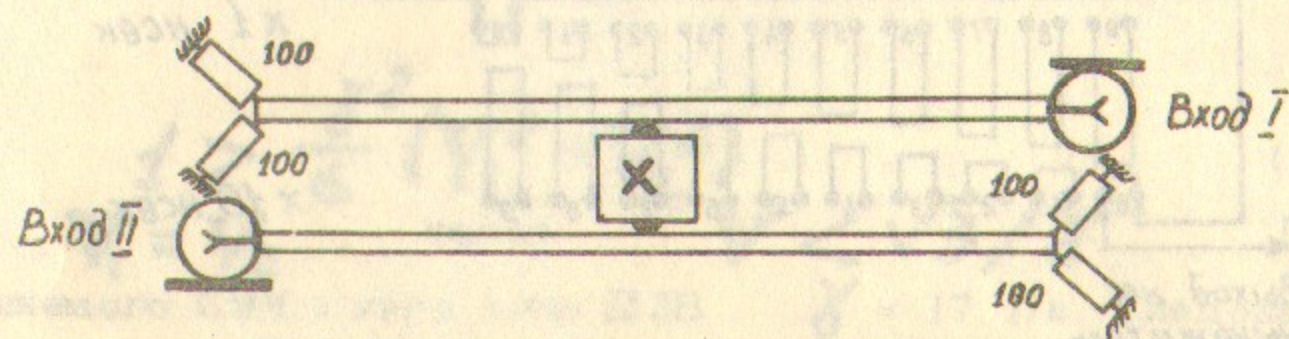


Рис.3. Линия задержки сшк-2.

согласованную 50-омную нагрузку. Согласованная нагрузка выполнена из двух объёмных 100-омных сопротивлений типа ТВО, соединённых параллельно. Для улучшения согласования применены ферритовые кольца, частично поглощающие отражённую от сопротивлений мощность.

Каретка, на которой собрана схема умножителя, посредством механической передачи плавно перемещается вдоль полосковых линий. Сигнал с полосковых линий подаётся на умножитель посредством скользящих контактов. Так как полосковые линии запитаны встречно, то нулевая задержка обеспечивается при нахождении каретки с умножителем в центре полосковых линий. При перемещении каретки вправо или влево вдоль полосковых линий в одном из плеч

коррелометра набегает задержка, равная 1 нсек на 120 мм хода каретки. Полный ход каретки вдоль полосковых линий 280 мм, т.е. в сшк-2 обеспечивается плавная задержка $\sim \pm 1,2$ нсек.

Для измерения АКФ в обоих коррелометрах используется согласованный коаксиальный тройник, два плеча которого с помощью кабелей строго одинаковой длины подключаются ко входам коррелометра.

Интегрирование, усреднение и регистрация

Интегрирование в СВЧ коррелометрах происходит на распределённых ёмкостях. Усреднение обеспечивается непосредственно регистрирующим прибором - фотогальванометром типа Ф-18.

Ввиду того, что коррелометр пассивный прибор, то его чувствительность целиком зависит от чувствительности регистрирующего прибора. Ф-18 обеспечивает чувствительность коррелометра ~ 1 мв. Верхний предел измеряемых амплитуд ограничен условием "неискаженного" произведения (11) и равен ~ 30 мв.

Экспериментальные результаты

Все проверки коррелометров производились с помощью генераторов стандартных сигналов типа ГМВ (20 - 400 Мгц), ГСС-12 (150 - 1000 Мгц), Г4-8 (1000 - 2000 Мгц) и Г4-9 (2000 - 3800 Мгц) ввиду отсутствия широкополосных источников шума перечисленного диапазона с достаточной выходной мощностью. На рис.4 представлены АКФ гармонических сигналов соответственно 200, 400, 1000, 2000 и 3000 Мгц.

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики коррелометров не превышает 6 дБ (рис.5).

Коррелометр сшк-1 использовался для измерения пространственных, временных и пространственно-временных корреляционных функций ленгмюровских колебаний плазмы на установках типа Q-машина. На рис.6 представлено две АКФ спектра колебаний плазмы. На рис.7 спектр колебаний плазмы, измеренный с помощью измерительных приёмников. Видно хорошее соответствие между АКФ № 1 и спектром. Пространственно-временные корреляционные функции обрабатывались на ЭВМ с целью нахождения распределения двумерного спектра плотности /5/.

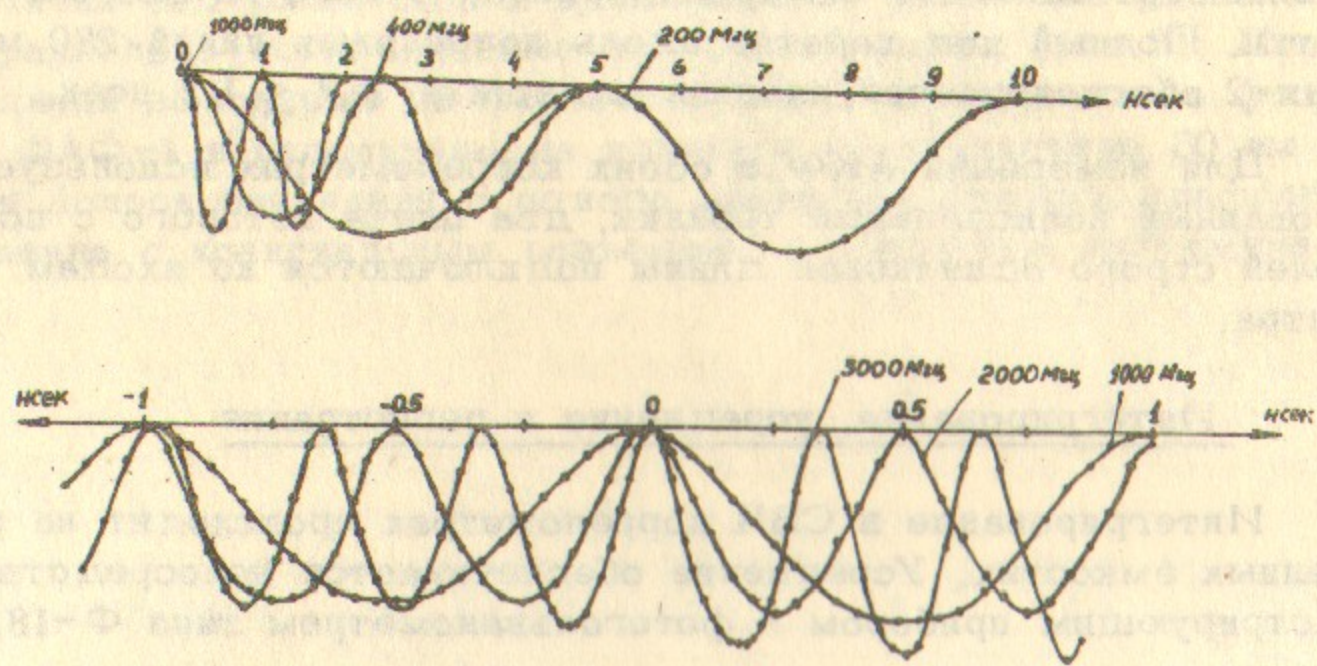


Рис.4. АКФ гармонических сигналов 200,400,1000,2000 и 3000 МГц.

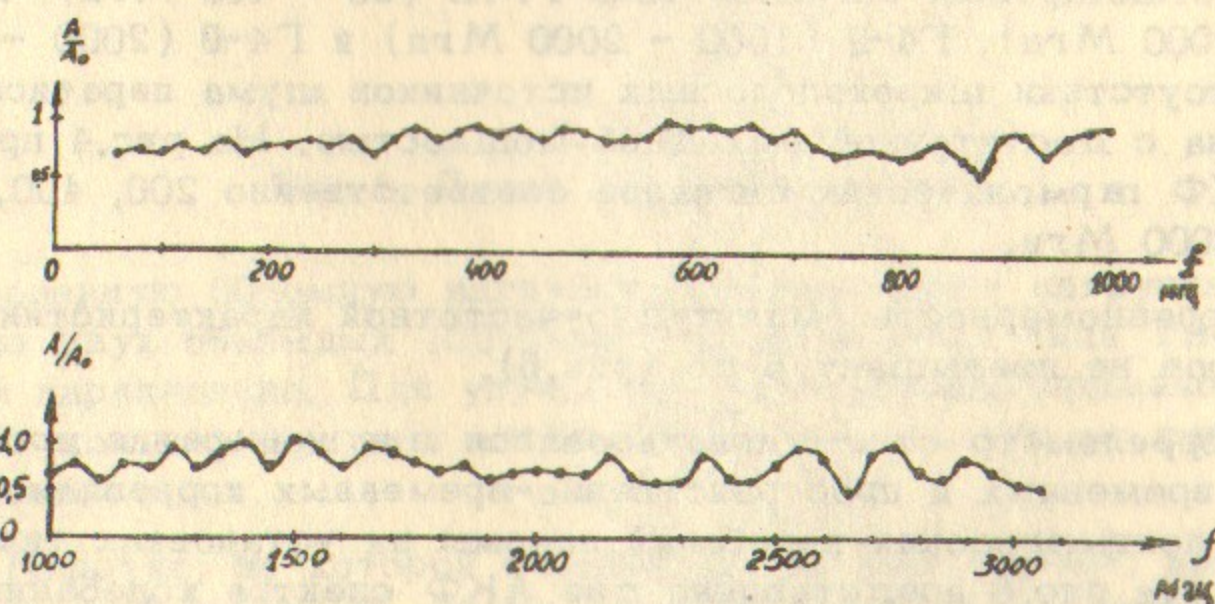


Рис.5. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики.

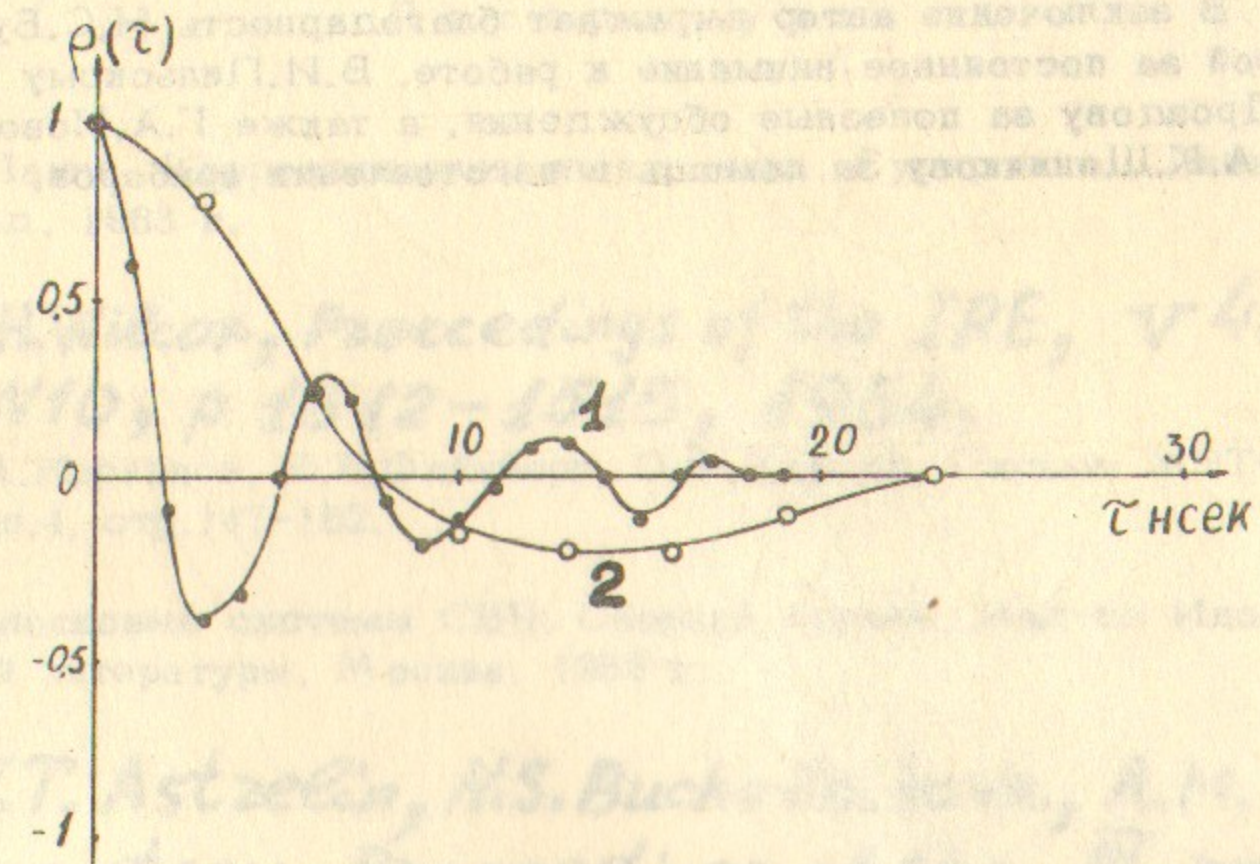


Рис.6. АКФ спектра колебаний плазмы в Q-машине.

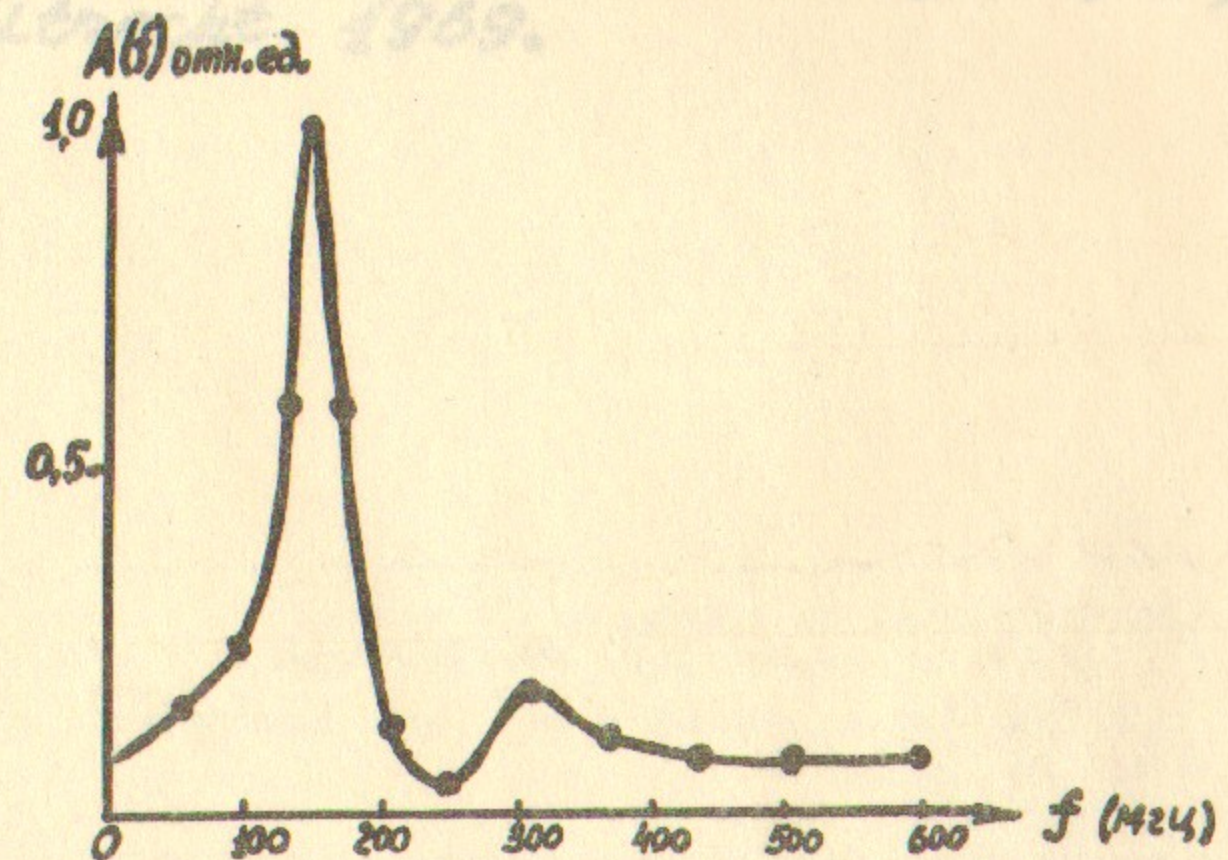
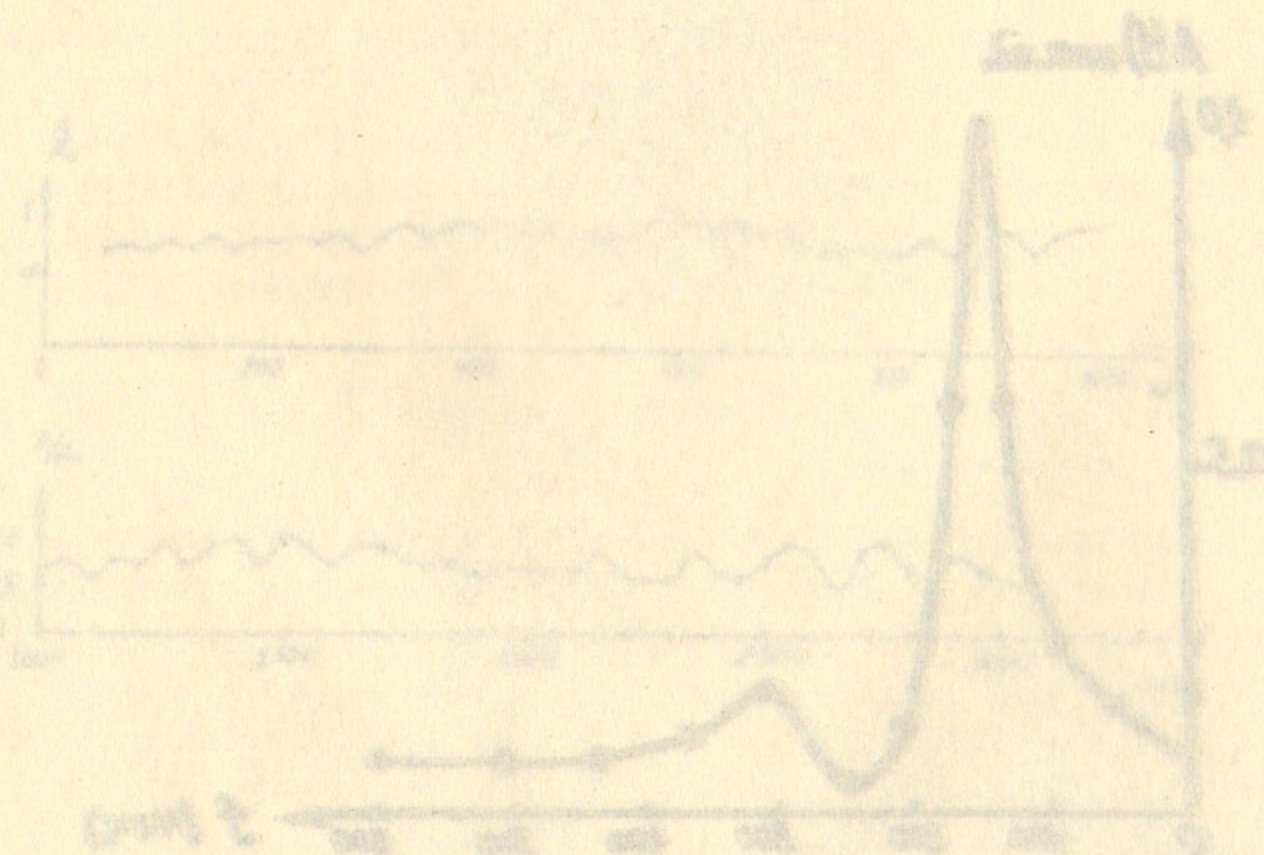
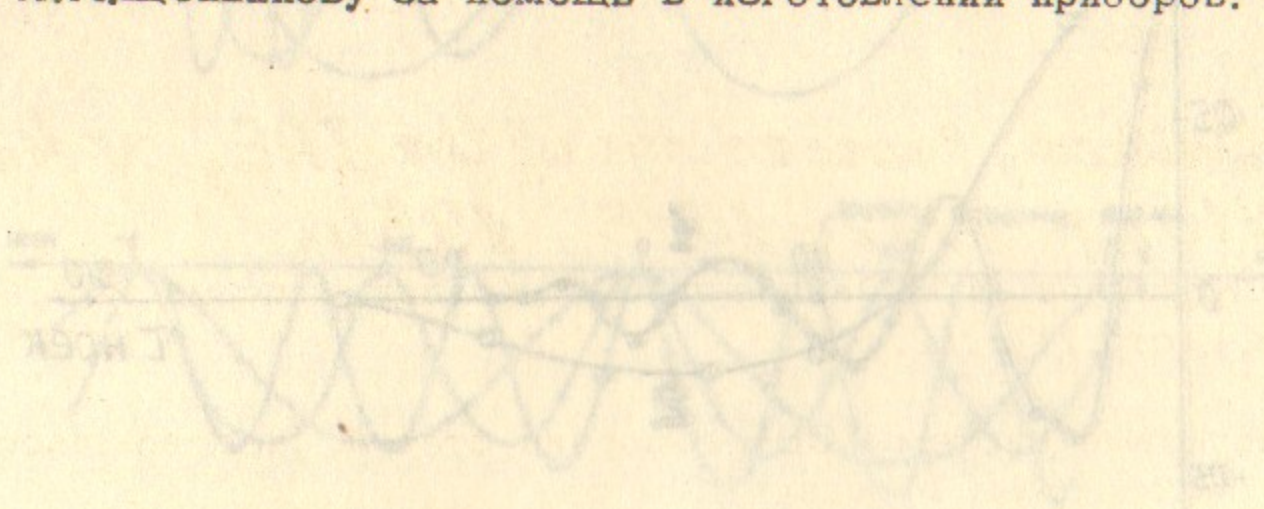


Рис.7. Спектр колебаний плазмы, измеренный с помощью измерительных приёмников (для АКФ № 1).

В заключение автор выражает благодарность Н.С.Бучельниковой за постоянное внимание к работе, В.И.Пильскому и А.А.Дроздову за полезные обсуждения, а также Г.А.Новосельцеву и А.К.Щенникову за помощь в изготовлении приборов.



Л и т е р а т у р а

1. Ф.Ланге. Корреляционная электроника, Судпромгиз, Ленинград, 1963 г.
2. **R.H.Wilcox, Proceedings of the IRE, v 42, N10, p 1512-1515, 1954.**
3. Е.А.Корнилов, Я.Б.Файнберг, О.Ф.Ковпик, Письма ЖЭТФ, т.1У, вып.4, стр.147-152.
4. Полосковые системы СВЧ, Сборник статей, Изд-во Иностранной литературы, Москва, 1959 г.
5. **V.T. Astzelin, N.S. Buchelnikova, A.M. Kudryavtsev, Proceedings of the III-zd European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, 92, Utrecht, 1969.**

