WHAMP-

ВОЛНЫ В ОДНОРОДНЫХ, АНИЗОТРОПНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ ПЛАЗМА

Кьелл Роннмарк

ОТЧЕТ KGI № 1 7 9

ИЮНЬ 1982 г.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ КИРУНЫ

КИРУНА SWFDFN

WHAMP-
Волны в однородной, анизотропной, многокомпонентной плазме

K

Кьелл Роннмарк
Геофизический институт Кируны
Университет Умео
S-901 87 UMEA, Швеция

Номер отчета KGI 179 .Июнь
198 2

Напечатано в Швеции.
Геофизический институт Кируны
Кируна, 1982 г.
ISSN 0347-6405

Сэр, в вашей прекрасной поэме (Видение греха) есть
такие строки: «Каждый миг умирает человек, каждую
минуту он рождается».

К сожалению, это не может быть правдой и .l s11:;ic:s;, что
в следующем издании вы. должны будете от r,,,,,d
«Каждый момент нашей жизни
каждое мгновение рождается 1 p\и ."
Даже это значение sl('hr{y in ern:,r bz,;t s./.r:; :,:[, l будет
достаточно точным для поэзии.

CHARL:JS B,'\.BBAGH
(письмо лорду Tllm.::'fSGN)

Список содержания

I. Введение

В этом отчете компьютерная программа, которая решает дисперсионное соотношение волн в замагниченной плазме, выводится с использованием кинетической теории однородной плазмы Диэлектрический тензор t:. = с максвелловскими распределениями скоростей. В эту версию программы можно включить до шести различных компонентов плазмы, и каждый компонент определяется своей плотностью, температурой, массой частиц, анизотропией и скоростью дрейфа вдоль магнитного поля. Таким образом, программа применима к очень широкому классу плазм, и метод должен быть в целом полезен всякий раз, когда однородную замагниченную плазму можно аппроксимировать линейной комбинацией максвелловских компонентов.

неты.

Общая теория, лежащая в основе программы, изложена в следующем разделе. Показано, что введением аппроксиманта Паде для функции дисперсии плазмы z бесконечные суммы модифицированных функций Бесселя, которые появляются в диэлектрическом тензоре t:. (w, k), можно свести к суммируемой форме. Полученное выражение для (w,

= -

) действителен для всех

настоящий и очень хорошо подходит для численной оценки. Аппроксимант Раа выводится в разделе III, где также обсуждается точность аппроксимации.

В следующих разделах описываются подпрограммы, составляющие программу, начиная с нижнего уровня в разделах:

раздел IV и выход на основную программу в разделе VII.

Наконец, результаты обсуждаются в последнем разделе.

II.Теория

Рассмотрим однородную, намагниченную многокомпонентную плазму. Каждая компонента состоит из частиц с зарядом qj и массой mj, а их фазовая плотность задается функцией распределения fj(Y, f, t}. Гирочастота частиц равна nj=qjBm31 в магнитном поле напряженностью B. При отсутствии внешних источников электрическое поле

§(w, } волны с частотой w и волновым вектором k, удовлетворяющим fies волновое уравнение

Đ(w, k)•Ɇ=O - (II-1)

где Q может быть выражено через тензор диэлектрической проницаемости (y),) как

$$\underline{\underline{D}}(\omega, \underline{k})=(\underline{\underline{I}}k^2-\underline{k}\underline{k})\frac{c^2}{\text{в}^2} - \underline{\underline{\varepsilon}}(\omega, \underline{k}). \tag{II-2}$$

Здесь J — единичный тензор, а c — скорость света. Волновое уравнение (1) имеет нетривиальные решения только в том случае, если

D(вх,)=det(вх, } =, (II-3)

и это дисперсионное уравнение мы стремимся решить.

Первый и самый сложный шаг при решении дисперсионной проблемы Соотношение сиона представляет собой оценку тензора диэлектрической проницаемости. Используя линеаризованную кинетическую теорию, стандартный вывод приводит к

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(\omega, \underline{k}) = \underline{\underline{I}} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\left\{\underline{\underline{I}} - \sum_j \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int d\underline{v}\, \underline{\underline{\Pi}} \frac{\frac{n\Omega_j}{v_\perp}\frac{\partial}{\partial v_\perp} + k_\parallel \frac{\partial}{\partial v_\parallel}}{\omega - k_\parallel v_\parallel + n\Omega_j} f_j^o\right\} \tag{II-4}$$

Вводя систему координат, образованную ортогональными единичными векторами 1, 3, ориентированными так, что !?=B 2,и ==k±, матрица

§ 1+к11 3 , дается (см., например, Ичимару, 1973, Ахиезер и др. 1975, Клеммов и Догерти, 1969) нрл. 2 нн . , нрл. 2

(---2 Дж) к Дж. н я - 1к _iJ J нн влл Дж н

нQ.

Тл = -i _JV JJ кJ. Дж . нн $(v_\perp J_n')^2$ $-iv_\perp v_\parallel J_n J_n'$ (II-5)

=

$\frac{n\Omega_j}{k_\perp} v_\parallel J_n^2$ $\quad i v_\perp v_\parallel J_n J_n'$ $\quad (v_\parallel J_n)^2$

The аргумент Бесселя функция Jn есть k J. VJ./ Qj. C плотности n· Дж. включены в плазменная частота

2

в = o:: w2.)1/2 = PJ j о: н.д . 1/2 (II-6)

p : по м: 1 : л)

ДЖОН

невозмущенное распределение f0 нормализовано к единице

$\int f^O(\underline{v})\, d\underline{v}$ = fL f (v) dv j Дж - = 1. (II-7)

Наиболее общая функция распределения, рассматриваемая в данном отчете, имеет вид

$f^O(v_\perp, v_\parallel)$ = p 6 дж = 1 (,r J 1/2 vii 2 -3 V.) exp (- (B' Дж. - B дДж')) •

(II-8)

$\left\{ \frac{\Delta j}{\alpha_{1j}} \exp\left(-\frac{v_\perp^2}{\alpha_{1j} V_j^2}\right) + \frac{1 - .6.j}{\alpha_{1j} - \alpha_{2j}}\right.$ [эксп (- $\frac{v_\perp^2}{\alpha_{1j} V_j^2}$) - эксп (- $\left.\frac{v_\perp^2}{\alpha_{2j} V_j^2}\right) \Big] \Big] \Big\}$

Здесь Vj — тепловая скорость компонента с температурой Tj = 1/2mjvj2, а Vdj — нормированная скорость дрейфа вдоль магнитного поля. Параметры tij, cq j и a2j определяют глубину и размер конуса потерь и анизотропию температуры.

Интеграл по пространству скоростей в уравнении (4) оценивается с помощью соотношений является

$$\int_0^\infty J_n^2 \quad к \; 1- \; в \; . \; л \quad (--)exp(---) \; си. \; v2 \; J \; J \quad 2 \; в \; .Л \quad \frac{2в \; .Л}{в} \; дв \; .Л = \Lambda_n(\lambda_j) \qquad \text{(II-9)}$$

Дж.

и

$$1T^{-1/2} \int_{-ой}^{00} \frac{\exp(-\frac{v_\parallel^2}{v_j^2})\, dv_\parallel}{v_\parallel - (\omega - n\Omega_j) k_\parallel^{-1}} = \frac{w-nS"l.}{k11V.J} Z(J) \; , \qquad \text{(II-10)}$$

где AnO·j)= e-Aj In(;>..j), Aj=1/2(кДж. B/ c-ij? , функция Бесселя Это модифицированный порядка n, а Z - функция дисперсии плазмы (Фрид и Конте, 1961). Диэлектрический тензор плазмы с распределением частиц описывается уравнением

(8) тогда можно записать как

$$\underline{(w, �)} ::c \quad (1 -) \; \frac{2 \; в}{В} \; 6 \; \underline{Я} + Л \; j=1 \quad \frac{В^2 \; . \; пж}{\omega^2 \alpha_{1j} (\alpha_{1j} - \alpha_{2j})}$$

$$\left[(\alpha_{1j} - /J..a2.)x \; J \pm a1J' \; \frac{a1}{Дж \; Дж} \quad (\Delta_j - 1) \underline{\chi} \; \alpha_{2j} \right] \qquad \text{(II-11)}$$

Для упрощения записи индекс j опускаем, вводим безразмерные величины

п :::: к С. В -Ст- , с = к11В -Ст- , $x = \frac{\omega}{\Omega}$, s_n = х-зв -н г / с (II-12)

и функция

1; a (х н , z) = (as + n/z) Z(s н) н (II-13)

Компоненты тензора восприимчивости определяются Кл. тогда выражением

Кт Х 11 = Кл. 2 Это не так. (аА) ко н=-что -1 2 + Я: н α з:;н

α Х1z = .это я ко н=-что нли. (этА) н α г;;н

а Х13 = а(1-а)п/з + (2/А)1/2 ко р: н=-да нли. (аА)-- н хн с кл г;;н

а Иксзз = а - Х11 2а2 у: ти. (аА) ко н=-да н а з:;н (II-14)

а Хz3 = иап ∞ я н=-да быть. в (а:>._) хн -- с α з:;н

Кл. Х33 = Кт л - , а)п /з 2 2 (1- + 2 2 х /С 2] + 2 Я ко н=-что ты. (к.;\)(--) н х - н 2 с а г; н

Оценку этих выражений можно значительно упростить, введя приближение для функции дисперсии плазмы в виде

$$з (с) \approx \sum_{l=1}^{L} b_l (s - c_l)^{-1}$$ (II-15)

Приближения этой формы могут быть получены с помощью модифицированного Метод Паде, обсуждаемый в разделе III, где отношение

ции

Л
6 л = - 1
Л 1=1

Л
1: клб л 1=1 = 0

Л 2
L клб л 1=1 = - 1/2

также выводятся (Уравнение III-10). Вводя y = xz (c1+Va), компоненты тензора sucept ibi 1 i ty теперь могут быть пере-
приведенный к форме

Л
X11 = a + aI: 1=1 б 1/11

Л
X12 = я р б л 1/11 1=1

Л
X13 = ap L 1=1 tc1 + Vd) б л 1/11

(II-16)

Л
X22 = X 11 - 2c/A б y-1 т/11
Л 1=1

Л -1 I =
X23 iap L bl (Cl + V d) yt/11
1=1

Л
X33 = a + 2+ + я. 2 (кл+Вд) бл y^{-1} [x-zv d+ A *i 1}
1=1

Здесь мы ввели обозначение

$$\psi_1 = (1 + \alpha z c_1 y^{-1}) \; R(y, \alpha\lambda)$$

$$\psi_1' = (1 + \alpha z \, c_1 y^{-1}) \; R'(y, \alpha\lambda) \qquad \text{(II-17)}$$

Функция R определяется как

ко 2 /\ (A)
н н
P(y, A) = Л ———— (II-·18)
н=-что и - н

и R' не совсем производная по отношению к A, но скорее

P'(y, A) = · ;\ (1tR(y,>-)) = :[n=- oo y - n ∞ $\frac{n^2 \Lambda_n'(\lambda)}{}$ = y^2 $\sum_{н=}^{\infty}$ $\frac{A'_н(A)}{да}$ н (II-19)

Некоторые аналитические свойства R и алгоритмы вычисления его значения обсуждаются в разделе IV. В общем, R(y,;\) можно оценить примерно за то же время, что и один

Ан(>-).

Сравнивая уравнение (14) с уравнением (16), мы замечаем, что следующие пункты:

1o Использование Eq 10n (14) · мы имеем примерно X a cc I: Н н=-Н нтн А

в то время как (16) дает x a L а: я: 6 ш1. 1= 1 л

Предполагая, что Antn может быть вычислено за то же время, что и W1, оценка (14) будет примерно в 2N/L раз трудоемче, чем оценка (16). Выбирая L=8, как в программе, мы видим, что эффективность уравнения (14) ком-

аналогично (16) для N 4.

2° Когда " велико, сумма по n в уравнении (14) равна 2 /2 >-) и медленно сходится. члены уменьшаются как exp(-n N »/2T, поэтому для сходимости необходимо. Последние Это делает прямой

Оценка (14) очень неэффективна для больших A Поскольку >.+co в уравнении (16), все компоненты x ведут себя непрерывно и в пределе они сводятся к своим правильным значениям.

3° Компонент x 33 в уравнении (14) содержит члены, пропорциональные z-2• Когда z мало, эти члены становятся большими и сокращаются так, как и должно быть, только если соотношение

ко
$A_н(A) = 1$
н =-что

выполняется в точности.

Это подразумевает, что N должно быть большим, когда z мало, и ошибки усечения wi 11 становятся серьезными для любого N, если z достаточно мало. Аналогичные аргументы применимы к членам, пропорциональным z-1 в X 13 и X 23. Поскольку z - о в уравнении

(16) все компоненты X ведут себя непрерывно и приводят к своим правильным значениям при z=0.

0 a. a. .

4 Компоненты X11 и X13 1n (14) пропорциональны

"--1 и "--1/2 соответственно. Это может привести к серьезным ошибкам усечения, когда"- мало, а предел A+O не может быть

взято численно. Как A+O в уравнении (16) все компоненты x

a. ведут себя непрерывно и они сводятся к правильному

значения для =O.

Диэлектрический тензор a. ;, (w,) вычисляется путем вставки

компоненты ; заданные уравнением (16) в уравнении (11).

Вводя показатель преломления =μ1 1 + μ3 3 и расширяя определитель Q(w,) по формуле (2), находим

D((llr k) = A (μ2 - s) 22 - Б + В (II-20)

где

$$A = \mu_1^2\varepsilon_{11} + 2\mu_1\mu_3\varepsilon_{13} + \mu_3^2\varepsilon_{33}$$

$$B = (\mu_3\varepsilon_{23} - \mu_1\varepsilon_{12})^2 + \mu^2(\varepsilon_{11}\varepsilon_{33} - \varepsilon_{13}^2) \qquad \text{(II-21)}$$

C = (s £. 11 .3 3 $- \varepsilon_{13}^2)\varepsilon_{22} + (\varepsilon_{11}\varepsilon_{23} + \varepsilon_{12}\varepsilon_{13})\varepsilon_{23} +$

$$+ (\varepsilon_{33}\varepsilon_{12} + \varepsilon_{23}\varepsilon_{13})\varepsilon_{12}$$

Формулы для производных D по w и k приведены в разделе VI. В основной программе метод итераций Ньютона используется для нахождения комплексного w, удовлетворяющего дисперсионному соотношению (3).

Machine Translated by Google

III. Аппроксимация Z-функции

Метод Паде был впервые использован для аппроксимации функции дисперсии плазмы Z(s) Мартином и Гонц-лесом (1979), а их результаты были обобщены Мартином и др. (1980) и

N meth и др. (1981). Основная теория Раа, аппроксиманты можно найти в книге Бейкера (1975).

Следуя Марту и др. (1980), мы рассматриваем приближения ZA(s) для функции дисперсии плазмы в виде

ZA(ы) = Пл - 1 (с) / Вл (с) = Л Σ 1=1 с / сбн 1 (III-1)

где ПЛ-1 (с) = Л-1 Я. л=О П1 С 1 и Q л (с) L 1 = 1 + r: qls 1=1

Вставляем сходящийся степенной ряд,

Z(s) == i rr - 2s - i 1r s + /;г 2 /;- 4 3 с + 3 я - 4 2 рр с - 1C с + •• (III-2) 8 5

в уравнении

$$Z(s)Q^{L}(s) = P^{L-1}(s) \qquad \text{(III-3)}$$

и определив коэффициенты при равных степенях s, мы получаем систему уравнений

$$\begin{cases} я/ир = р\ 0 \\ -2 + i\sqrt{\pi}\, q_1 = p_1 \\ - i\sqrt{\pi} - 2q_1 + i\sqrt{\pi}\, q_2 = p_2 \\ 4/3 - i\sqrt{\pi}\, q_1 - 2q_2 + i\sqrt{\pi}\, q_3 = p_3 \\ \cdot\ \cdot\ \cdot \end{cases} \qquad \text{(III-5)}$$

Здесь мы принимаем p1 = 0, если l>If-1, и q1 = O, если J>L·.

Альтернативный набор уравнений получается путем вставки асимптотический ряд

Z(ы) - с -1 - 1 -3 2 с - 3 -5 с 4 15 - 8 с -7 - . . . (III-6) в уравнении (3):

$$\begin{cases} -q_L = p_{L-1} \\ -q_{L-1} = p_{L-2} \\ -q_{L-2} - 1/2q_L = p_{L-3} \\ -q_{L-3} - 1/2q_{L-1} = p_{L-4} \\ \cdots \end{cases} \qquad \text{(III-7)}$$

Поскольку нам нужно 2L уравнений для определения всех p: s и q: s, мы положим J+K=2L и выберем J уравнений из (5) и K уравнений из (7). Полученное приближение будет удовлетворять

$$|Z_A(s) - Z(s)| = \begin{cases} O(s^J), & s \to 0 \\ O(s^{-K}) & s \to \infty \end{cases}$$

В качестве альтернативы, мы могли бы начать со второго класса из (1) и расширенный

ZA(s) = L бл Л 1=1 { - 1 ал - с 2 аль - с 2 3 аль - 3 с -:р ал + .. только; с -1 + c1c -2 + c1 c 2 -3 c1s 3 -4 + + .. Да. } (III-8)

Сравнение с (2) и (6) приводит к уравнениям

$$\sum_{l=1}^{L} \frac{b_l}{c_l} = -i\sqrt{\pi}$$

Л Σ 1=1 кл с 2 = 2 (III-9)

Л с 1: кл -·3° = i ppp- 1=1

. . .

и

Л
с = - 1
р. 1=1

Л
блк л = 0
р. 1=1

Л
Я блк л 1=1 2 = - 1/2 (III-10)

Л
Я блк л 1=1 3 = 0

. . .

На практике наиболее удобный способ вывести разложение аппроксимирующей функции в простейшую дробь — исключить p:s из L уравнений (5) и (7) и определить (s)=O, затем решить относительно и L нетривиальные уравнения имеют вид

q:s из них. Уравнение Q л

полюса с1, с2, . . . cL ,

выбранные из (9) и (10) для определения b:s.

После этой процедуры был получен восьмиполюсный аппроксимант с использованием десяти уравнений из (5) и шести уравнений из (7). Значения коэффициентов приведены в Таблице 1.

Таблица 1

c1 = 2,237 687 789 201 900 - i 1 • 6 25 940 856 173 727

c2 = -c1 *

c3 = 1 • 465 234 126 106 004 - i 1.789 620 129 162 444

c4 = -c3 *

c5 = .8392 539 817 232 638 - i 1 • 891 995 045 765 206

С6 = -c.5 *

c7 = .2739 362 226 285 564 - я 1. 941 786 875 844 713

что = -c7 *

b1 = -.017 340 124 574 718 26 - i .046 306 392 916 803 22

б2 = б *1

b3 = -.739 916 992 322 50H, + я 8 39 .517 997 809 9844

б4 = б *3

b5 = 5,840 628 642 184 073 + i • 9 ,5 3 600 905 764 3667

b6 = b* 5 b7 = -5,583 371 525 286 853 - i 11. 2 085 431 912 6599

б8 = б7 *

Machine Translated by Google

В верхней половине s-плоскости точность этого аппроксиманта должна быть достаточной для всех целей. Однако при Im s < 0 ошибки увеличиваются по мере приближения s к полюсам, поскольку опущенный экспоненциальный член

с и когда s 1, 2 -i 2 1r
1/

2 exp (-s) в асимптотическом ряду для Im s<O может стать важным. Рисунки 1 и 2 показывают относительные погрешности (Re(ZA (s) - Z(s))/Re Z(s) · 100% и Im(ZA (s) - Z(s))/Im Z(s) • 100% для Im s = -1/2 Res. Мы видим, что относительная погрешность в Re ZA остается меньше 2%, а погрешность в Im ZA меньше 3%. Ошибки наибольшие для s между 2-i и 3-i 1,5, и, таким образом, их можно отнести к влиянию полюса с1.

Ан

Очевидная проблема с рациональными приближениями для функции Z заключается в том, что экспоненциальное поведение Im Z (s) =

112
1p exp (-s 2) для действительных s нельзя точно аппроксимировать рациональной функцией конечного порядка. Аппроксиманты обсуждаемого здесь типа обладают довольно тревожным свойством, что Im ZA (s) < 0 для некоторых действительных значений s (см. также Martin et al. (1980)). Абсолютная погрешность Im ZA(s) для действительных s показана на рис. 3, где важным моментом является то, что небольшая погрешность для 5<s<10 делает Im ZA(s) отрицательной в этом интервале. Физически это означает, что очень слабо затухающая волна может казаться слабо неустойчивой, поскольку Z заменяется на ZA при решении дисперсионного соотношения. Имея эту возможность в виду, однако, не должно быть трудно отслеживать и игнорировать эти «численные нестабильности»

если они появляются. Большие абсолютные ошибки, появляющиеся для s-3, обычно должны быть незначительными, поскольку Im ZA >O, а относительная ошибка составляет менее 2 %.

Machine Translated by Google

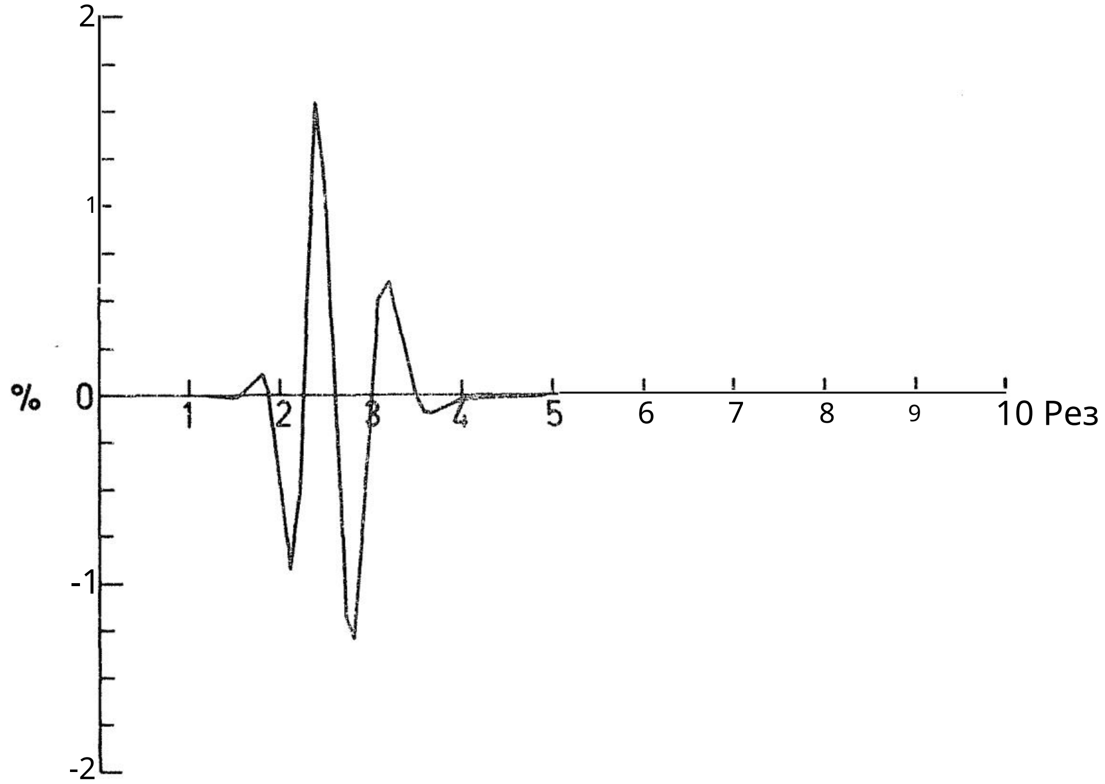

Рисунок 1 Относительная погрешность Re ZA(s) в зависимости от Re s для Im s = - 1/2 Res.

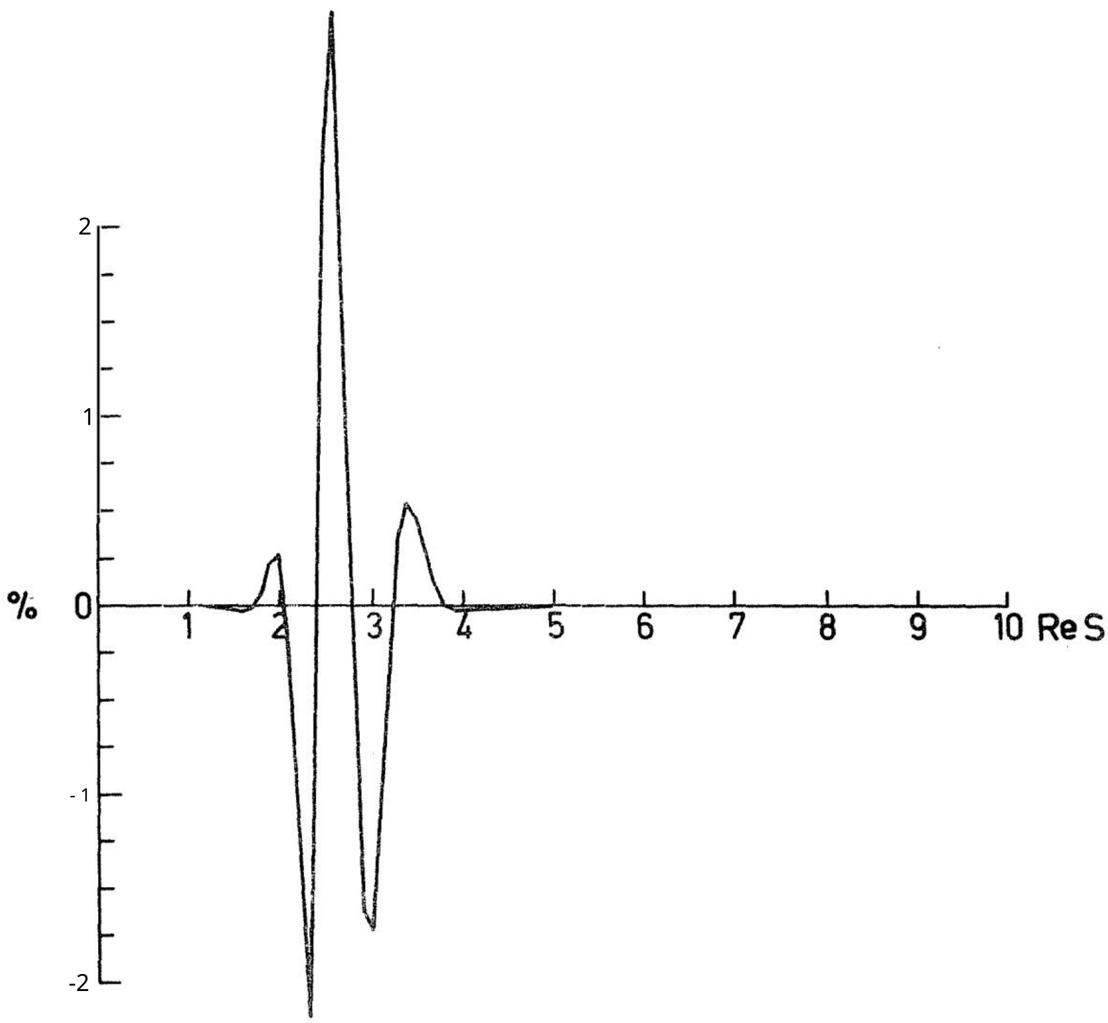

Рисунок 2 Относительная погрешность Im (s) против Re s для

Им с = - 1/2 Рез.

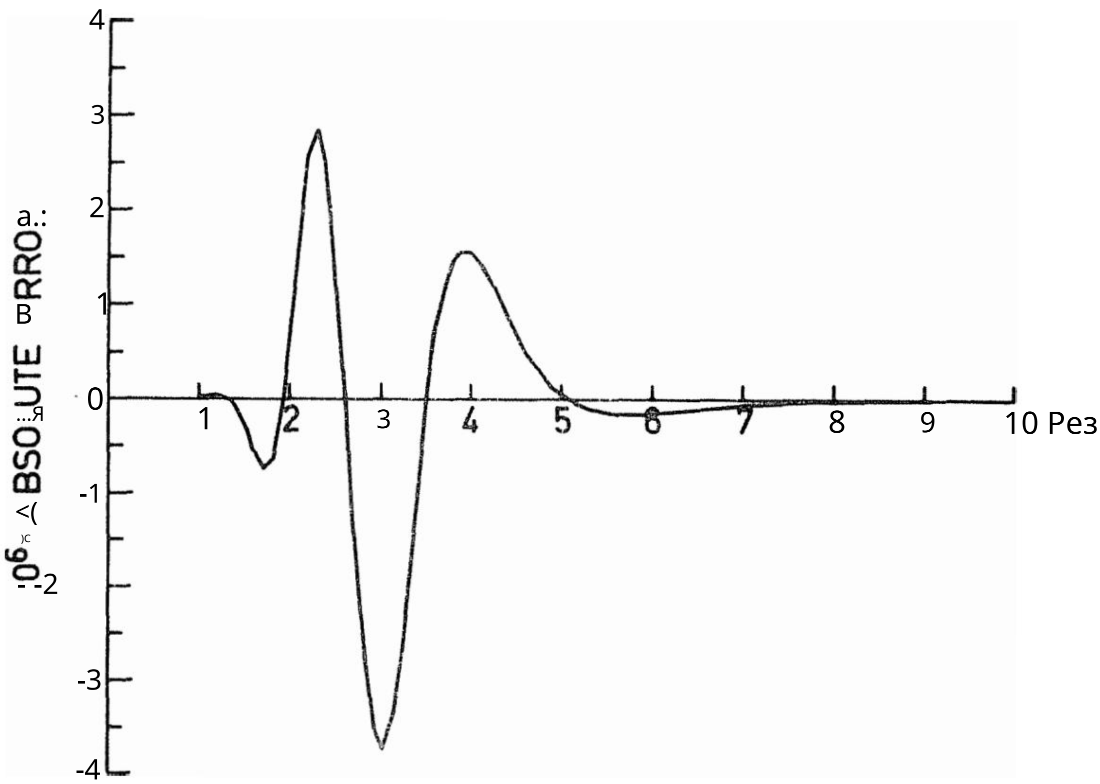

Рисунок 3 Абсолютная ошибка Im ZA (s) в зависимости от s для

В с = О.

IV. Функция Y. L l.

ПОДПРОГРАММА RTAY

Функция R, введенная в разделе теории, определяется как

R(y, >,.) = что н 2 Σ н=-= >,. (ин) /\н (A) (IV-1)

c/\ n(>,.) = e-\In(;\). Тесно связанные функции были исследованы, например, Амодтом (1967), Фредриксом (1968) и Карпманом и др. (1973) в их исследованиях волн с

клл Ри О.

Из соответствующих соотношений для модифицированных функций Бесселя легко показать, что R удовлетворяет рекуррентным соотношениям

clR(y,11,_) / cl;\ = [R(y-1,:\) + R(y+1,;,_)] 1 2 − P(y,;,_) (IV-2)

и

yR(y, A) = 1 2 ;\[R(y-1d) - P(y+1,;,_)] + 1 (IV-3)

Дифференцируем R дважды по A, используя (2) и (3) получаем дифференциальное уравнение

A2 IR 0)R - - + (3+2 ') •' l ',. 2 a a>,. AA + -y + AR 2 3) (1 = y = 0 (IV-4)

Подставляя степенной ряд вместо R, находим решение

R ( ) =-f---+ ' \ y 2 2 y y -1 (y -1) (y -4) 1·3 + и 2 2 (и -1) (и -4) (и -9) 1•3•5 1. 2 2 >,. + • • •

(IV-5)

= 1ry 2 -- я ----�"- (2н) ! (- л >,.) н 2
>,. sin rry n = l (n-1-y) ! (или) ! н!

Этот ряд легко вычисляется и быстро сходится для малых 1 >. • Может быть, менее очевидно, что он полезен также для больших >. если y »;\. В этом случае ранние члены (n « y) 2)n, и их величина будет иметь вид y(2n+1) ! ! (>.. y- будет быстро уменьшаться. Последующие члены останутся малыми и

несущественно, если только y не чрезвычайно близок к целому числу.

SUBROU1'INE RASY

Когда >. велико, асимптотический ряд для R(Yd) очень полезен. Так как e-"'In(\)+ (2n>.)-1/2 как>. oo определение (1) то R{y,:\ ) "'":\ -i [(2 \/n)-1/ 2 y2 cotny - y] для больших >. • , мы видим из

Вводя n = >,.-1 и P= n-1R, дифференциальное уравнение (4) преобразуется к виду

2 3 3 П 3П 2
н - - + (п-2)п - + (1-ин)П = -y а11 (IV-6)
2 года

Частное решение этого уравнения:

$$G (день) = -и + и н \ldots \frac{3\,3 + v\,(1-y^2)}{3}\,\eta^2 + \frac{y^3(1-y^2)(4-y^2)}{1\cdot3\cdot5}\,\eta^3 \ldots \qquad \text{(IV-7)}$$

Дополнительная функция H(n) =n -l/ 2 Таким образом, P(n) удовлетворяет однородному уравнению

2 а 2 Н 3Н 2
н + 2(н-1) 8Н + (д - y)H = 0 (IV-8)
а 4

условием H(O) = y2 (n/2) 1 /2 cotny, и с граничным решение найдено

$$H(n)=y\,(\ )\ котни\ 1^{2\,ТТ\,1/2} \left\{ + \frac{\frac{1}{4} - и^2}{2\quad 1!}\,н + \frac{(\frac{1}{4}-y^2)(\frac{9}{4}-y^2)}{2^2\cdot 2!}\,\eta^2 + \right. \qquad \text{(IV-9)}$$

$$+ \frac{(\frac{1}{4}-y^2)(\frac{9}{4}-y^2)(\frac{16}{4}-y^2)}{2^3\cdot 3!}\,н^3 \quad \ldots$$

+ л я ф

Возвращаясь к исходным переменным, мы можем записать асимптотический ряд в удобной форме

$$R(y,\lambda) \simeq \sum_{n=0}^{\infty} R_n \qquad (A >> 1) \qquad \text{(IV-10)}$$

где Rn определяется рекурсивной формулой

$$Рн+2 = \frac{н^2 - 4 и^2}{(n+1)\ 4;>,.} \quad Рн$$

и (IV-11)

$$R_o = -y/\lambda$$ и 2 TT 1/2 R = y (--3) cotTTy 2 ;>..

Этот ряд дает очень точные результаты для A > 1 0, если y не слишком велико. Однако из рекурсивных соотношений (11) мы видим, что если y2 > ;\ » 1, то ранние члены будут увеличиваться по величине примерно как y2 / (n ;>..) • В этом случае сходимость, очевидно, будет медленнее, и точность может быть легко

потерян из-за ошибок усечения.

ПОДПРОГРАММА RINT

Интегральное представление функции R(y, ;i._) можно получить, вставив

1 2 2 / и -н = --- n TT (-1) f cos n уютный d греховный о (IV-12)

в определении (1) и используя производящую функцию для In (;>,.)

$$e^{\frac{\lambda}{2}(t+t^{-1})}$$ ∞ = Я: т н Н=-= В (А) (IV-13)

Это приводит к представлению

P(y,;>..) = - __ y_ J e-;\(1+cosw)sin is sinu d из боже мой (IV-14)

При больших значениях y фактор sin YlP будет быстро колебаться, и прямое численное интегрирование становится затруднительным. Как описано Фредриксом (1968), эти колебания можно устранить, оценивая интеграл вдоль правильно выбранного контура в комплексной плоскости tP.

Сначала мы частично интегрируем (14) , чтобы найти

$$R(y,\lambda) = (y^2 I(y,\lambda) - y)/\lambda \qquad \text{(IV-15)}$$

где

Я (й' :).) = $\frac{1}{\text{грех или о}}$ f -1, (1+COS(.f)) cos YlP dtµ=

= $\frac{1}{\text{sinrry o}}$ A(COS(.()-1) cos y(tP-n)dtP= (IV-16)

= 1 2 (Я+ + Я_)котный + 1 2и (Я+ - Я)

Здесь мы определили

\ ,) = i (1T 0 A (COS(.()-1) ± iy(J)din I± y,/ (IV-17)

Полагая tP =<Hi 13 и y=w+i Y, находим, что мнимая часть показателя степени равна -;i._sirrnsinh 13 ± wa + yl3. Если бы y был действительным, как в случае, рассмотренном Фредриксом (1968), контуры C ± , показанные на рисунке 4, были бы траекториями стационарной фазы. Фаза равна нулю на мнимой оси и вдоль кривых, начинающихся с ± B0 = sinh-1 W/'J... • В терминах 1jJ (a) = ya/.\.sina эти кривые определяются как 13 =±sinh-11/J. Фазовый сдвиг

Machine Translated by Google

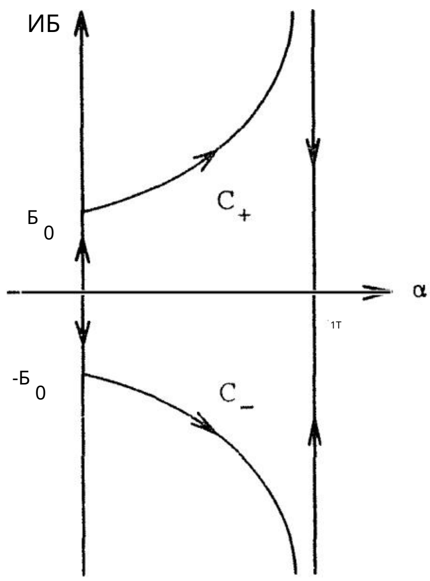

Рисунок 4. Контуры для интегралов r± в комплексной плоскости .

имеет место при a= TI , C = ±oo
где подынтегральные функции являются
экспоненциально малы, и
вдоль линии CL = 7T фаза равна
±wn. Когда y является
комплексный, контуры из
стационарной фазы больше не нет
могут быть явно определены. из-
Однако, пока y < < w мы могли бы
ожидать, что колебания будут сильно

затухающие вдоль контуров C±.
Интегрируя по этим путям, находим

B

Я± (y ,\) = ±i J 0 и \(coshS-1)-yB dS+

1/2 + -1 -1 (IV-18) 2
{e\[(1+ijJ) cosCL-1]-ysinh ijJ±CLy[1±iasinh ijJ]da+ ∂α
0

± ис°e\ (co шC-1)-yS ± i.in-dS
00

Используя уравнение (16), после некоторых преобразований находим, что вклады из строки CL= 1r сокращаются, а оставшиеся вклады могут быть записаны

Б 0
I(y, A) = f e A (coshx -1) -yxdx +
0
(IV-19)

7T
+ ж и T (x) -yB (x) [Ф (x)C (x) + H (x)S (x)] dx
0

где T (x) = A[(1+t 2)1/2cos x-1], B(x) = sinh-11µ, C(x) = cosh yx, S(x) =i sinh yx, F(x) = cot 1r y + G(x) , H(x) == 1-G(x) cot1ry, и G(x) = aB/ax. Эта нотация выбрана для соответствовать именам переменных, используемым в коде.

Machine Translated by Google

Производные I± из уравнения (17) оказываются следующими:

$\frac{\partial I_\pm}{\text{является}}$ = ± я ф 1т 0 и A (COStp-1) ± iytp(pdtp

а I± ""ар- = е J1r О >-(cos tp-1) ± iytp (co s tp-1) d tp (IV-20)

$\frac{\partial^2 I_\pm}{\partial y \partial \lambda}$ = ±i Дж из 0 Да (COS<P- 1) ±iy<P(cos <.p-1) tpd(p

Преобразование этих интегралов в контуры C ± и их объединение, как предписано производными уравнения, утомительно, но просто. Производные (16) I(y, >.) таким образом оказываются

y.! = есть - yc o trry J B 0 и >. (co s hx - 1)-yx xdx

-yf и TI T-B и 0 [F•OH•P+D(CG•S)]dx

0 >,l.!->.J ;\(c os hx - 1)-yx h cos X dx да - Б и 0 (IV-21)

+ Дж. 1т 0 и T-yB [(F•T-Hxw)C+(H•T+Fxw)S]dx

$y\lambda\frac{\partial^2 I}{\partial y \partial \lambda}$ = -yc o t1ry J Б 0 0 и ;\ (coshx -,)-yx (co s hx - 1)x dx −

$$- y \int_0^{\pi} e^{T-yB}\left\{F(T\cdot O-P\omega x)-H(T\cdot P+O\omega x)+[(T+G\omega x)C-(GT-\omega x)S]D\right\} dx$$

где мы ввели D = TI (1+cot 2 ny), O(x) = B(x) C(x) + xS (x) и P(x) = xC (x) - B(x) S (x). Наконец, из уравнения (15) имеем

или =
ура 2 P + y/">-(y 2 оИ
является + 1)

P = 0
0A (AP) = 2
годыИЗ (IV-22)

= 2 P' + 3 и 2 а г
ори - есть ая">-

Интегралы (19) и (21) вычисляются с помощью квадратуры Гаусса. формула тура, использующая 16 точек. Абсциссы A(I) и веса W(I} взяты из Abramowitz и Stegun (1965).

Когда у велико, подынтегральное выражение во втором интеграле становится очень малым, когда x приближается к TI. Полуэмпирическая формула завод UL= TI - 2 .8y(36+y)-l дает T(UL)-yB(UL),..,,, - 100 и мы Таким образом, можно безопасно интегрировать только до UL, получая повышенную точность на оставшемся интервале.

SUBROUTINE RYLA

Подпрограмма RYLA возвращает (2,2)-массив RC,

PK = P(y,">-) И oR (y, ;q
является
P (y, ">-) или (y, ">-)
является (IV-2 3)

Значение RC рассчитывается одним из трех методов описаны выше. Для заданных значений y и ">- , метод выбранный можно найти на рисунке 5. Сравнивая различные методы, мы обнаруживаем, что они согласуются по крайней мере с шестью знаками после запятой вдоль границ, показанных на рисунке 5, и В большинстве случаев точность должна быть еще выше внутри каждого региона.

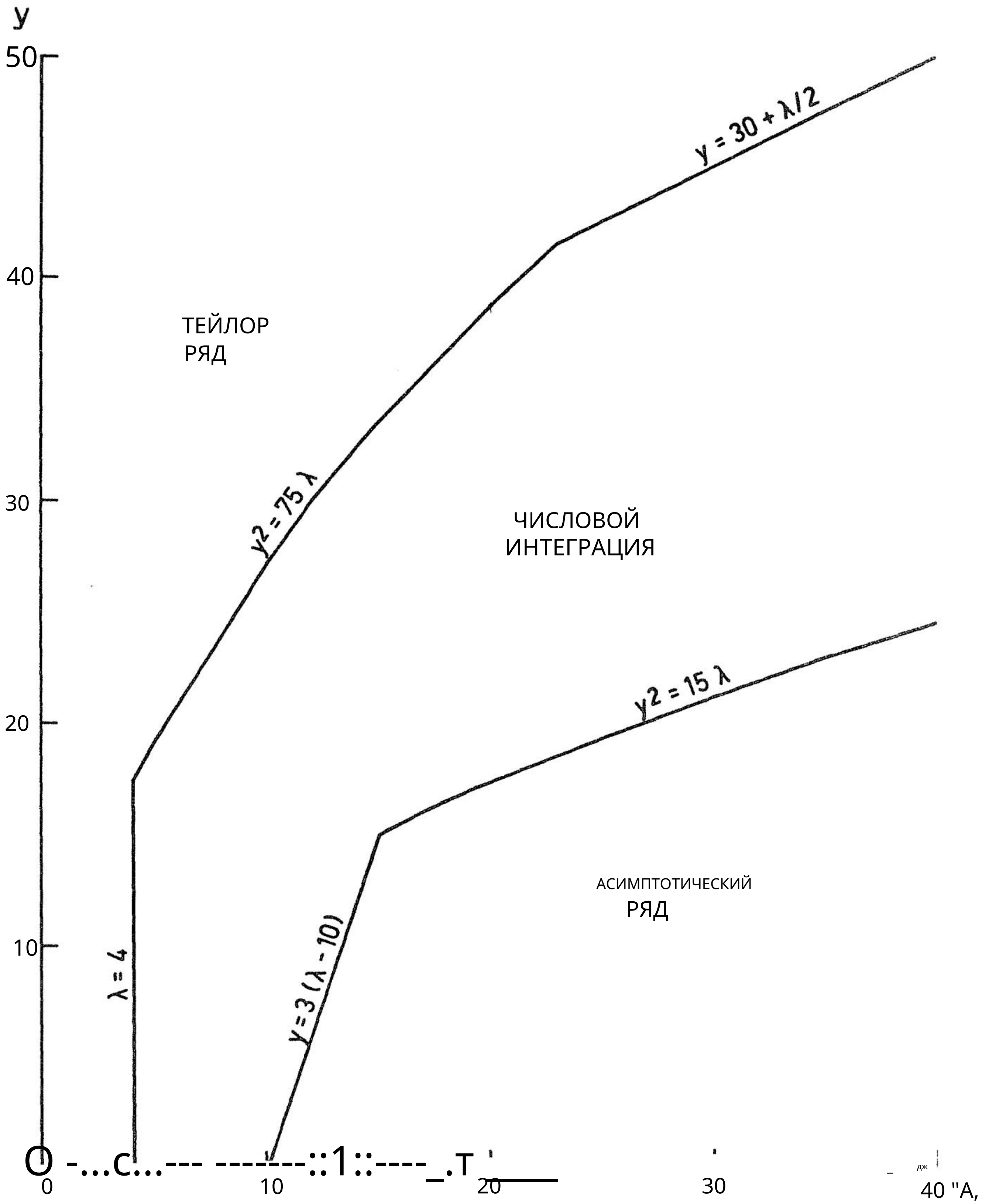

Рисунок 5. Различные методы, используемые для вычисления R(y, j,) , показаны на этом графике плоскости Ay.

```
C          ВРЕМЯ= 82/04/29 - 10.29.29


           SUBROUTINE RYLA<Y,AL,RC>
           КОМПЛЕКС Y, RC(2,2>
C
C                **** ВЫБЕРИТЕ МЕТОД ОЦЕНКИ ****
           ЕСЛИ(AL.LT.4) ПЕРЕЙТИ К 1
           AY=CABS<Y>
           ЕСЛИ<AY**2.GT.75.*AL) ПЕРЕЙТИ К 1 ЕСЛИ<AY.GT.30.+AL/
           2.) ПЕРЕЙТИ К 1
C
           ЕСЛИ<AY**2.LT.15.*AL.AND.AL.GE.15.)                  ПЕРЕЙТИ К
           2 ЕСЛИ(AY.LE.3.*(AL-10.>.AND.AL.LE.15.)) ПЕРЕЙТИ К 2
C
C                   **** ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ ****
           ВЫЗОВ RINT(Y,AL,RC>
           ВОЗВРАЩАТЬСЯ
C
C                   **** СЕРИЯ ТЕЙЛОР ****
        1 ВЫЗОВ RTAY<Y,AL,RC)
           ВОЗВРАЩАТЬСЯ
C
C                   **** АСИМПТОТИЧЕСКИЙ РЯД ****
       2 ВЫЗОВ РАСЫ<Y,AL,RC>
           ВОЗВРАЩАТЬСЯ
           Д
```

```
C         ВРЕМЯ= 82/04/29 - 10.31.47

          ПОДПРОГРАММА RTAYCY,AL,RC>
          КОМПЛЕКС Y,Y2,RCC2,2),PN,PYN,COT
C                   ******** СЕРИЯ ТЕЙЛОР******
          Y2=Y*Y
       10 PN=Y / < Y2- 1 • )
          ПИН=-Y*<Y2+1. )/(Y2-1. )**2 RC<i,l)=PN
          RC<1,2)=PN
          RC(2,1)=PYN RC
          C 2, ::;:• > =PYN

C

          DO 1 1==2, 100 COT=C2*I-1)/
          CY2-I**2>*AL PYN=COT*<PYN-2.*Y2/CY2-I**2>*PN>
          PI\I=COT*F'N 1 ) =RC< 1 1 > +F'N RC C 1 RC<2,1)=RC(2,1)+PYN
          RC<1,2)=RC(1,2>+I*PN
          < PN) 1 .    ,   RC(2,2>=RC(2,2)+I,*PYN * T=CABS
          E::: ЕСЛИ<T.LT.CABS(RCC1,1))) ПЕРЕЙТИ К 2 1
          ПРОДОЛЖИТЬ 2 ПРОДОЛЖИТЬ КОНЕЦ
```

```
C           ВРЕМЯ= 82/04/29 - 10.31.47

            ПОДПРОГРАММА RASY(Y,AL,RC>
            КОМПЛЕКС Y,Y2,COT,P,PY,PP,PPY,PN,PYN,QN,QYN,RC(2,2>
C                   ******** АСИМПТОТИЧЕСКИЙ РЯД******** PI=3,14159265358979 Y2=Y*Y
            COT=CCOS<PI*Y)/CSIN<PI*Y> C=1,E99 PN=-
            Y/AL PYN=PN
            A=1./(AL*SQRT(2)).*PI*AL

            QN=PI*Y2*COT*A
            OYN=QN*<2.-Y*PI*COT>-Y*PI**2*Y2*A
C
            P=PN+QN
            PY=PYN+QYN
            PP=-PN-1,5*QN PPY=-
            PYN-1,5*QYN AY=CABS<Y>+2.

C
            DO 4 N=t,100 M=N-1

            PYN=(PYN*<M*M-Y2)-2.*Y2*PN)/((2*M+l)*AL> PN =PN*<M*M-Y2)/
            ((2*M+1>*AL)
            QYN=(QYN*<<M+.5>**2-Y2)-2.*Y2*0N)/(2.*N*AL> QN =QN*<<M+.5)**2-Y2)/
            (2.*N*AL> ЕСЛИ(M.LT.AY) ПЕРЕЙТИ К 3 C=N*<CABS(PN)
            +CABS(QN))

            ЕСЛИ(C.LE.1.E-7*CABS<PP>> ПЕРЕЙТИ К 5 ЕСЛИ(C.GE.T>
            ПЕРЕЙТИ К 5 3 P =P + PN + QN

            PY =PY+ PYN + QYN PP =PP -<N
            + 1.)*PN -(N +1,5)*0N PPY=PPY-<N + 1.>*PYN-<N
            +1,5)*QYN 4 T=C

Г
          5 RC(1,1>=P + PN + QN
            RC<2,1>=PY+ PYN+ QYN
            RC(1,2>=ПП+П
            PCC2,2)=ППЙ+ППЙ
            ВОЗВРАЩАТЬСЯ
            КОНЕЦ
```

```
C          ВРЕМЯ= 82/04/29 - 10.31.47


           ПОДПРОГРАММА RINT<Y,AL,RC)
C                    ******** ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ********
           КОМПЛЕКС RC(2,2),Y,COT,D,EXF,F,H,O,P,R,RY,RP,RPY,S
           РАЗМЕР А(16), Ш(16)
C             АБСКИСЫ ДЛЯ ГАУССОВОЙ ИНТЕГРАЦИИ
           ДАННЫЕ А/                        -.98940 09349 91649,-.94457 50230 73232, 440:3:3 55003,-.61787 62444
          D -.86563 12023 87831,  91649,         -.75540 -.28160 :35507 79258,-.09501 25098           02643,
          D --• 45801 6777 6 D [I • !3(:, 16:",::   57227,   .94457 50230 , :::; 4 ·?.1 т) · 440:::::3 55003, .61787 62444 35507   37637,
                                          • •?J:::•3)4(}               .09501 25098                      73232,
          12(>2: : D • 45::K> 1 6777 6 ВЕСОВОЙ   87831,   .75540                                         02643,
          КОЭФФИЦИЕНТ:::; [I 1,J D • 0'?   57227,   .28160            79258,                            :376:::.:7 Я,
C           515 :::5116
                                          .02715        24594 11754, .06225 35239 2:8647,
                 ;
                             82492,       12462         :3 17 12 c:-: c:. 18945 06995'; 18a3 16576, ._I ._t ._t._, ,.:, , :3415() 44• ;2::::,
          Д . Н:,915 i:::,519:3 95002, [I D .09515   . 1132/.:,   55(il-:,:::, 24594 1 1754, .06225 352:3•7 :3::i/:.,4'7 :::•; 712 C:' 14959 59(::8:?.
                                          () 02715      16 i7 6, :34150 4492:;:, . 1 :=:114.5 06104 55(i(;,e:;
          85116 82492, D .16915 65193 95002, D   12462
          PI/3.14159265358979/            1 ф::2/.:,()


C
           ДО 1 Я== 1 -,4 1 РК
          ( Я ) = ( 0 . ·, 0. )
           YA=AIMAG(Y)
           Y=РЕАЛЬНЫЙ(Y)
           UL=PI-2.8*Y/(36.+Y)
           COT=CCOS(PI*Y)/CSIN(PI*Y)
           D=ПИ*(1. + КОТ**2 )
           C=YR/AL
           XO=ALOG(C+SQRT(1. + C**2))
C
           ДО 10 Я::-::: 1, 16 X=UL/
           2.*(1.+A(I))
           Z='.:;B< X)
           C=CO:::; ( X )
           O=ЙР/АЛ*X/ЗТ=СГ!
           РТ(1.+Г**2)
           B=ALOG(O+T)
           G= ( 1 • / X ·-C / Z ) *G / T * T=Al < T
           *C--1 . >
           Z=EXP<X*YA>
           C=.5*(Z+1./Z)
           S=(0.,.5)*<Z-1./Z)
           F=COT+O H=
           1 • ··"G*COT
           EXF==CEXF'CT-Y*B)
           O=B*C+X* ;
           P==X*C··B*3
           XY=X*YR R==
           < F*C+H· '.:;) *EXF
           RY=<F*OH*P+D*(C-·G*S))*EXF RP=( (F*TH*XY)*C:l
           (l+ T-1-F*XY)*S)*EXF RPY=<F*<T*O-XY*P)-H*(T*P+XY*O)+
           ((T+XY*G>*C-<G*T-XY>*S)*D)*EXF
C
           X=X0/2.*(1. + А (л))
           Z=EXP(X)
           C=(Z+i./Z)/2.-1.
           P=CE XF' ( ( L.-i CY *X)
           ФК ( 1 1 ) ==ФиС ( J    , 1. ) ·1-\..,I ( л ) (УЛ *Р +-ХО*П)
           RC(2,1>=RC<2,l)-W(l)*(UL*RY+XO*X*Pl
```

```
      RCC1,2)=RCC1,2)+W(l)*(UL*RP+XO*AL*C*P)
      RC(2,2)=RC<2,2)-W(l)*(UL*RPY+XO*AL*X*C*P)
   10 ПРОДОЛЖИТЬ
C
      ИЛИ=И/АЛ
      P=Y**2/2.
      RC(l,l>=O*<Y*RCCl,1)/2.-1.)
      RC<2,1)=2.*RC(1,1)+0*(P*RC(2,1)+1.>
      RC(1,2)=Y*O*RCC1,2)/2.
      RC(2,2)=2.*RC(1,2)+0*P*RCC2,2)
      КОНЕЦ
```

V. Тензор восприимчивости X КЛ; ПОДПРОГРАММА CHI

Тензор восприимчивости, определенный КЛ уравнением (II-16), оценивается в подпрограмме CHI, и результат возвращается
в (6, 4)-массиве XSI.

Параметры аппроксимации Z-функции хранятся в массивах B (вычеты) и C (полюса). Если аргумент Z(s) находится слишком далеко в комплексной s-плоскости,

Состояние ошибки IERR=l возвращается в вызывающую процедуру.

Для каждого члена в разложении простейших дробей значение R(y, a:\), где y = x - z(c1 + Va), получается из
SUBROUTINE RYLA.

Функции

1/J = (1 + azc1y-1)R(y,a:\) (V-1)

и

$$\psi' = (1 + \alpha z c_1 y^{-1}) R'(y,\alpha\lambda) \tag{V-2}$$

хранятся в переменных PS и PSP соответственно, а компоненты формируются в соответствии с уравнением (II-16). из Кл.

Когда KOL 2, производная по оси x x Кл. также оценивается. Мы первая форма

психология = (1 + azc1y -1 >Ура aR — (V-3)

и

ппы = (1 + азц1й -1)яй aP ' (V-4)

и затем получать

ДП = X топор = X/и (ПСЙ - a.zc1 y -1 R) (V-5)

и

ВВЕРХ = X '- топор X – - (ППЯ и - центр убежища 1 год -1 P ') (V-6)

Machine Translated by Google

а.

Определение D1 = c1 + Va, компоненты xa ;ax могут быть написано как

$$x \frac{\partial \chi_{11}^{\alpha}}{\partial x} = $$ 8 а Л B1[xlj; + y DP] 1=1

$$x \frac{\partial \chi_{12}}{\partial x}$$ = ia.L Bl UP 1=1 8

$$x \frac{\partial \chi_{13}}{\partial x}$$ = aП}: Б1Д1ДП 1=1 8

(V-7)

$$x \frac{\partial \chi_{22}}{\partial x} = x \frac{\partial \chi_{11}}{\text{топор}} - $$ 2a \}: B1y [DPP-xy I/;] 2 -1 -1 Я 8 1=1

акс23 X ---- топор = иап I: B1D1y-1[DPP - xy I/;] -1 ' 8 1=1

ах33 х-- топор = 2a я=1B1D1Y [x 2 -1 + \ДП - xy (x-zVd+\lj;)] -1 8

Производная z Кл, оценивается, когда KOL 3. Замечание что ay/az = -D1 получаем

DP = z $$= \frac{z}{y} [\alpha c_1 x y^{-1} R - D_1 PSY]$$ (V-8)

и

ДПП = z $$\frac{\partial \psi}{} = \frac{z}{y} [\alpha c_1 x y^{-1} R' - D_1 PPY]$$ (В-9)

а
и выражения для za /<lz легко записываются через эти функции.

Когда KOL 4, p-производные также оцениваются. SUB-- Сначала вызывается ПРОГРАММА RYLA для оценки R(y-1, a:\), и затем

ДП = Поп боже мой = 2 (1jJ - 1jJ) (B-10)

и

ДПП = - п на = 2 2 [J._ a;\R (y-1, aA) 2 y я -1 - aAijJ]- yDP (B-11)

формируются. Формулы для P o /op тогда тривиальны а

полученный.

```
Г.          ВРЕМЯ= 82/04/29 - 10.31.47

            ПОДПРОГРАММА CHI<XSI,J,IB,COL,IERR)
C                    АРГУМЕНТЫ: XSI СОДЕРЖИТ ТЕНЗОР ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПО ВОЗВРАТУ.
C
C                         Дж.       НОМЕР КОМПОНЕНТА.
C                         один      ИНДЕКС ДЛЯ АА (АЛЬФА>
C                         ПОКА      ОПРЕДЕЛЯЕТ, НУЖНО ЛИ ОЦЕНИВАТЬ ПРОИЗВОДНЫЕ.
C
C                         ФЛАГ ОШИБКИ IERR, УСТАНАВЛИВАЕТСЯ = 1, ЕСЛИ ЗАТУХАНИЕ
C                                   СЛИШКОМ СИЛЬНОЕ.
            КОМПЛЕКС X,XX,XY,AI,BL,CL,DL,BLY,RC(2,2),XSI<6,4), 2
              B{8),C(8),PS,PSP,PSY,PPY,DP,DPP,Y,ZY
            ОБЩИЙ /XPZ/ XX(6l,PP(6),ZZ(6),AA(6,2),DD(6),ASS(6),VDC6)
C        ****  ОСТАТКИ ДЛЯ АППРОКСИМИРОВАННЫХ ДАННЫХ        ****
            ПАДЕ B/(-1.734012457471826E-2,-4.630639291680322E-2), B (-1.734012457471826E-2,
          4.630639291680322E-2), B <-7.399169923225014E-1, 8.395179978099844E-1),
          (-7.399169923225014E-1,-8.395179978099844E-1), BB < 5.840628642184073 , 9.536009057643667E-1>, B
                  ( 5.840628642184073 ,-9.536009057643667E-1), (-5.583371525286853 ,-1.120854319126599
          El>, B 1,120854319126599 Эл)/, Б <-5,583371525286853

C           **** ПОЛЮСА АППРОКСИМАЦИИ ПАДЕ          ,         ****
     C        Cl (2,237687789201900, -1,625940856173727>,
     C            (-2,237687789201900, -1,625940856173727),
     C   -        ( 1,465234126106004, -1,789620129162444),
     C            C-1,465234126106004, -1,789620129162444),
     C            (.8392539817232638, -1,891995045765206),
     C            (-.8392539817232638, -1.891995045765206),
     C            ( .2739362226285564, -1,941786875844713),
     C            (-.2739362226285564, -1.941786875844713)/
C
            X=XX(,J)
            Z=ZZC,J)
            P=PP < ._t >
            A=AA < ,J, IB )
            VZ=VD(,J)*Z A I= ( 0
            • 1 • ) *A IF ( A::; ; (,J) •
            EO. 0. ) AI =-AI AL=.5*F'*P ALA=A*AL

C
            ДО 1 Я= 1 1     .,24
          X::;Я(Я)=(O.,O.)
            XI=AIMAG(X)
            ЕСЛИ (XI. OE. O. ) CiOTIJ 3
            NX=X
            RX==X-·NX
C                    ИСПЫТАНИЕ НА СИЛЬНОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ
            ЕСЛИ<RX.GT .. 5) RX=l.-RX
            ЕСЛИ(XI.GE.-.6*RX.OR.XI.GE.-Z) ПЕРЕЙТИ К 3 IERR=l ВОЗВРАТ :3 x::n < 1 ., 1) ==A

            XSI(6,1)==A*<1.
          + 2.*VD(J )**2 )

            ДО 4 Л= 1, ::: БЛ=Б(Л.)

            КЛ=C(Л.)
            ДЛ=КЛ +ВД ( ,Дж)
            Y=-X-DLttZ
```

Machine Translated by Google


```
      БЛЙ=БЛ/Г
C        ******      ОЦЕНИТЬ R-ФУНКЦИЮ ****** ВЫЗОВ RYLA<Y,ALA,RC)

      XY=1. + A*Z*CL/Y
      ПС=XY*RC(l,1)
      ПСП=XY*RC(l,2)
C                    ****** ТЕНЗОР ВОСПРИИМЧИВОСТИ ФОРМЫ******
      XSI(1,1)=XSI<1,1)+A*BL*Y*PS XSI(2,1)=XSI(2,l) +
      AI*BL*PSP XSI(3,1)=XSI(3,l) + A*P*BL*DL*PS
      XSIC4,l)=XSI(4,1)+BLY*PSP XSI(5,l)=XSI(5,l)
      +AI*P*BLY*DL*PSP
      XSI(6,l)=XSI<6,1)+2.*A*BLY*DL**2*<X-VZ + AL*PS>

C
      ЕСЛИ<KOL.LE.1> ПЕРЕЙТИ К 4 ******
C                  ФОРМИРУЙТЕ X-ПРОИЗВОДНЫЕ XSI ****** PSY=XY*RC(2,1)

      ППY=XY*RC(2,2)
      XY=X/Y DP
      =XY*(PSY-A*Z*CL/Y*RC(l,1))
      DPP=XY*<PPY-A*Z*CL/Y*RC<1,2))
      XSIC1,2)=XSI(1,2)+A*BL*<Y*DP+ X*PS >
      XSI(2,2>=XSI<2,2)+AI*BL*DPP
      XSI(3,2)=XSI(3,2)+A*P*BL*DL*DP
      XSI<4,2)=XSI(4,2)+BLY*(DPP-XY*PSP)
      XS1(5,2)=XSI(5,2}+AI*P*BLY*DL*<DPP-XY*PSP)
      XSI(6,2>=XSI<6,2) + 2.*A*BLY*DL**2*(X+AL*DP-XY* (X-VZ+AL*PS ))
C
      IFCKOL.LE.2> ПЕРЕЙТИ К 4 ******
C                  ФОРМА Z-ПРОИЗВОДНЫХ XSI ******
      ZY=Z/Y DP
      =ZY*<A*CL*XY*RC(1,1}-Dl*PSY> DPP=ZY*(A*CL*XY*RC(l,2)-
      DL*PPY)
      ZY=DL*ZY
      XSIC1,3)=XSIC1,3) + A*BL*Y*(DP-ZY*PS)
      XSI(2,3)=XSI(2,3)+AI*BL*DPP
      XSI(3,3)=XSI(3,3)+A*P*BL*DL*DP
      XSI(4,3)=XSI(4,3)+BLY*<DPP+ZY*PSP)
      XSI(5,3)=XSI(5,3J+AI*P*BLY*DL*<DPP+ZY*PSP)
      XSI(6,3)=XSI(6,3)+2.*A*BLY*DL**2*(AL*DP-VZ+ZY*(X-VZ + AL*PS))
Г
      IFCKOL.LE.3> ПЕРЕЙТИ К 4
C                ****** ФОРМА P-ПРОИЗВОДНЫХ XSI ******
      CALL RYLA<Y-1.,ALA,RC)
      DP=2.*(PSP-PS)
      DPP=2.*AI*((Y/(Y-1.))**2*RC(1,2)-PSP>-Y*DP XSI<1,4)=XSI(1,4)+A*BL*Y*DP
      XSI(2,4)=XSIC2,4)+AI*BL*DPP
      XSI(3,4)=XSIC3,4)+A*P*BL*DL*(DP+PS)

      XSI(4,4)=XSI(4,4)+BLY*(2.*PSP+DPP)
      XSI(5,4)=XSIC5,4>+AI*P*BLY*DL*<PSP+DPP> XSI(6,4)=XS1(6,4)+4.*A*BLY*DL**2*AI*PSP
      4 ПРОДОЛЖИТЬ ****

C             КОМПЛ"Е XSI14, )          ****
      XS1(4,1)=XSI(1,1)-2.*A**2*AL*XSI(4,1)
      XSI<4,2>=XSI(1,2)-2.*A**2*AL*XSI(4,2)
      XSI(4,3)=XSI<1,3)--2.*A**2*AL*XSI(4,3)
      XSI(4,4)=XSI(1,4)-2.*A**2*AL*XSI(4,4)
      КОНЕЦ
```

VI. Дисперсионная функция D {w, }s); ПОДПРОГРАММА ОТЛИЧНАЯ

В этой процедуре тензор диэлектрической проницаемости {w,) сначала формируется в соответствии с уравнением {II-11), используя значения

a (w, k) получено из ПОДПРОГРАММЫ CHI. Компоненты с =

и производные x = если:§ / ax, z = za /az, и p =

p 3 /ap хранятся в массиве E (6, 4). После оценки показателя преломления значение дисперсионной функции D(w,) вычисляется, как описано в уравнении (II-20). Соответствующие формулы для производных Dare:

$$\Omega_1 \frac{\partial D}{\partial \omega} = \frac{\Omega_1}{\omega} \left\{ (\mu^2 - \varepsilon_{22}) A_x - (2\mu^2 + \varepsilon_{22,x}) A - B_x + C_x \right\} \qquad \text{(VI-1)}$$

где

$$A_x = \omega \frac{\partial A}{\partial \omega} = (\varepsilon_{11,x} - 2\varepsilon_{11})\mu_1^2 + 2(\varepsilon_{13,x} - 2\varepsilon_{13})\mu_1\mu_3 +$$

$$+ (\varepsilon_{33,x} - 2\varepsilon_{33})\mu_3^2$$

$$B_x = \omega \frac{\partial B}{\partial \omega} = 2(\mu_3\varepsilon_{23} - \mu_1\varepsilon_{12}) \left[\mu_3(\varepsilon_{23,x} - \varepsilon_{23}) - \mu_1(\varepsilon_{12,x} - \varepsilon_{12})\right] +$$

$$+ \mu^2 \left[(\varepsilon_{11,x} - \varepsilon_{11})\varepsilon_{33} - 2(\varepsilon_{13,x} - \varepsilon_{13})\varepsilon_{13} + (\varepsilon_{33,x} - \varepsilon_{33})\varepsilon_{11} \right]$$

(VI-2)

$$C_x = \omega \frac{\partial C}{\partial \omega} = (\varepsilon_{11,x}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{11}\varepsilon_{33,x} - 2\varepsilon_{13}\varepsilon_{13,x})\varepsilon_{22} +$$

$$+ (\varepsilon_{11}\varepsilon_{33} - \varepsilon_{13}^2)\varepsilon_{22,x} + \varepsilon_{23}(\varepsilon_{11,x}\varepsilon_{23} + 2\varepsilon_{11}\varepsilon_{23,x} + \varepsilon_{12}\varepsilon_{13,x} +$$

$$+ 2\varepsilon_{12,x}\varepsilon_{13}) + \varepsilon_{12}(\varepsilon_{33,x}\varepsilon_{12} + 2\varepsilon_{33}\varepsilon_{12,x} + \varepsilon_{23}\varepsilon_{13,x} +$$

$$+ 2\varepsilon_{23,x}\varepsilon_{13})$$

Д = г1, {' 2 (.µ -s)A + (2µ3 - s 2 2 z 2 2 2 , c) A - Б c + C_z} (VI-3)

zk II V I

где

И от = кн и-;; аА $= \mu_1^2 \varepsilon_{11,z} + 2\mu_1\mu_3(\varepsilon_{13,z} + \varepsilon_{13}) + \mu_3^2(\varepsilon_{33,z} + 2\varepsilon_{33})$

Bz = в :�II = - · — 2(μ3 е 23- μ1 И 12) [μ3(Е23, из + е 23) - μ1 £1 2 1 +

+ 2μ3 (е 11 Е:33- е 13)+ μ (е 11, с Е:33+ с 11Е:33, с- 2Э: 13Э:13, з)
2 2 2

(VI-4)

$$C_z = k_{\parallel} \frac{\partial C}{\partial k_{\parallel}} = (\varepsilon_{11,z}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{11}\varepsilon_{33,z} - 2\varepsilon_{13}\varepsilon_{13,z})\varepsilon_{22} +$$

$$+ (\varepsilon_{11}\varepsilon_{33} - \varepsilon_{13}^2)\varepsilon_{22,z} + \varepsilon_{23}(\varepsilon_{11,z}\varepsilon_{23} + 2\varepsilon_{11}\varepsilon_{23,z} +$$

$$+ \varepsilon_{12}\varepsilon_{13,z} + 2\varepsilon_{12,z}\varepsilon_{13}) + \varepsilon_{12}(\varepsilon_{33,z}\varepsilon_{12} + 2\varepsilon_{33}\varepsilon_{12,z} +$$

$$+ \varepsilon_{23}\varepsilon_{13,z} + 2\varepsilon_{23,z}\varepsilon_{13})$$

и

$$D_P = \frac{\Omega_1}{V_1} \frac{\partial D}{\partial k_{\perp}} = \frac{\Omega_1}{k_{\perp} V_1} \left\{ (\mu^2 - \varepsilon_{22}) A_P + (2\mu_1^2 - \varepsilon_{22,P}) A - B_P + C_P \right\} \qquad \text{(VI-5)}$$

где

α = кл. : � л · · = μ � (И 1 1, П + И 1 1) + 2 это 1 μ 3 (с 1 3 , П+ И 1 3) + мк; и 3 3 , П
2

3Б БП = кл 3К = ⊥ 2 (мк3 Э:23- мк1 И 12) [μ3£23,р-μ1 (Е 12,Р + с 12)] +

+ 2JJ1 2 (Э11) И 33- И 2 13) +)Дж (2 и: 11,Р Е:33+ Е: 11 Е33,Р- 2Е 13Е13,Р)

(VI-6)

С п = к и - л 3кл- Э:11,ɦ Э33 + Э: 11 Э:33,П) -2 И 13 Э: 13, ЭП:22 +

+ (Э:11 Е 33- Е 13л Е 2 22, П + Э:23[И 11, ЧП:23 + 2Э 11 И23,П +

$$+ \varepsilon_{12}\varepsilon_{13,P} + 2\varepsilon_{12,P}\varepsilon_{13}] + \varepsilon_{12}[\varepsilon_{33,P}\varepsilon_{12} + 2\varepsilon_{33}\varepsilon_{12,P} +$$

$$+ \varepsilon_{23}\varepsilon_{13,P} + 2\varepsilon_{23,P}\varepsilon_{13}]$$

Machine Translated by Google

Для вычисления электрической и магнитной составляющей поля 1 и решения волновых
E1 = уравнений мы произвольно задаем
ция (II-1)

D(w, k)•E = 0

для остальных компонентов поля. Решение есть

$$\begin{cases} E_2 = \dfrac{(\mu_3^2 - \varepsilon_{xx})\varepsilon_{xy} - (\mu_1\mu_3 + \varepsilon_{xz})\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xy}\varepsilon_{yz} + (\mu_1\mu_3 + \varepsilon_{xz})(\mu^2 - \varepsilon_{yy})} \\[2ex] E_3 = -\dfrac{(\mu_3^2 - \varepsilon_{xx})\varepsilon_{yz} - (\mu_1\mu_3 + \varepsilon_{xz})\varepsilon_{xy}}{(\mu_1^2 - \varepsilon_{zz})\varepsilon_{xy} - (\mu_1\mu_3 + \varepsilon_{xz})\varepsilon_{yz}} \end{cases} \qquad \text{(VI-7)}$$

В особых случаях, таких как k11 =O или k =O есть волны с
Дж_
E1 = 0 и указанное выше решение не будет действительным. Для
При параллельном распространении мы имеем либо электростатическую волну с E1 = E2
= O, E3 = или циркулярно поляризованные волны с
1
E2 = ±iE1, E3 = 0. Волны, распространяющиеся перпендикулярно
магнитное поле является либо обычным с E1 = E2 = O, E3 = или необычным с E3 = 0, E2 1
= - E: 11/t: 12E1. Во всех случаях амплитуда электрического поля нормируется так, что II 1,
а магнитное поле рассчитывается из
2 =

Закон Фарадея

$$\underline{B} = (\underline{k} \times \underline{E})/\omega .$$

```
C           ВРЕМЯ= 82/04/29 - 10.31.47

            ПОДПРОГРАММА DIFFU<KOL,JMA,IERR)
C                          ARGUMENTS: KOL           =2 D И ЕГО X-ПРОИЗВОДНАЯ ВЫЧИСЛЕНА =4 ВСЕ
(                                                   ПРОИЗВОДНЫЕ И ВОЛНОВЫЕ ПОЛЯ =1 - 6, КОЛИЧЕСТВО
C                                     ,JMA          КОМПОНЕНТОВ.
C                                     ИЕРР             ФЛАГ ОШИБКИ.
            КОМПЛЕКС X,XX,E(6,4),XSI(6,4>,XP,DF,U1,U2,U3,U12,U13,U32,
          2 A, B, C, ДА, ДБ, ДЦ, Д, DX, ДЗ, ДП, ЭФЛ(3), БФЛ(3)
            ОБЩИЙ /XPZ/ XX(6),PP(6),ZZ(6),AA(6,2),DD(6),ASS(6),VD(6),
          C DN(6),TA(6),XP(6),CV
            ОБЩИЙ /COUT/X,P,Z,EFL,BFL,D,DX,DZ,DP,E
C
(                     *********** ФОРМА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕНЗОРА************
            ДО 1 K=1,4
            ДО 1 I=1, 6 1
          E<I,K)=(O.,O., E(i,1)=1.

            E<4,1)=1.
            EC6,1)=:1.
C
            ДО 5 ,J= 1 , ,JMr;1 ) =E
            E < 1  , ( 1 l ) -X F' <„J > E(4, 1 )=E(4,
            1 )-XP(,J)
            E ( 6, 1 ) =EU:., 1 ) - XP (,_I)
            ЕСЛИ<AA(J,1).NE.AA(J,2)) ПЕРЕЙТИ К 2 AA< ,J, 2) =O.

            DD< ,J) = 1 2   ·
          IB=l
            DF=XP(J)/(AA(J,1)*(AA(J,1)-AA(J,2l))
            Q=AACJ,1>-DD(J)*AA(J,2)
          3 ВЫЗОВ CHI(XSI,J,IB,COL,IERR> IFCIERR.NE.Ol
            ВОЗВРАТ К 4 <=1, COL К 4 I=l, I:., 4
            E<I,K)=ECI,K)
            +DF*Q*XSI(l,K)

C
            ЕСЛИ<IB.EQ.2) ПЕРЕЙТИ К 5
            Q=<DD(J)-1.)*AA(J,1)
            IFCQ.EQ.0.) ПЕРЕЙТИ К 5 IB=2

            ПЕРЕЙТИ К
          3 5 ПРОДОЛЖИТЬ
C                      ***    ВЫЧИСЛЕННЫЙ ТЕНЗОР ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ***
C
C              ******* ФОРМИРУЙТЕ ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ, CV=СКОРОСТЬ СВЕТА/ТЕПЛОВАЯ СКОРОСТЬ. ***
            Ui=PP(l)*CV/XX<l> U3=ZZ(1)*CV/
            XXC1)
            U12=U1**2
            U::::2=U::::**2 U:2=U
            12+1J::::2 U 13=2. *У
            1 *У;:
C
C                      ******** ФОРМА ДИСПЕРСИОННОЙ ФУНКЦИИ********
            A=U12*E(1,1)+U13*E(3,1)4U32*E<6,1)
            B=U2*<E<1,1)*EC6,1)-E(3,1)**2)+(U3*E(5,1)+U1*E(2,1>>**2
            C=<E<1,1>*E(6,1)-E(3,1>**2>*E(4,t)+E(6,1)*EC2,1)**2
            C=C+ (E (1  ,  1) *Э (5, 1) +2. *Э ( 2, 1 ) *Э ( ::::  ,  1 ) ) *И ( 5, 1 )
C
            D=(U2-E(4,1))*A-B+r ЕСЛИ (COL..
            LE. 1 ) F:ETIIRt,1
```

```
****** ПОЛНАЯ X-ПРОИЗВОДНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕНЗОРА******
E<1,2)=E<1,2)-2.*CE(1,1)-1. > E(2,2)=E(2,2)-2.*
E(2,1)
E(3,2)=E(3,2)-2.* E(3,1)
E(4,2)=E(4,2)-2.*<E<4,1)-1.)
EC5,2)=E(5,2l-2.* E<5,1>
E(6,2)=E<6,?)-2.*(E(6,1)-1.)
****** X-ПРОИЗВОДНАЯ ДИСПЕРСИОННОЙ ФУНКЦИИ*******
DA=(E(1,2)·2.*E<1,1))*U12+U13*(E(3,2)-2.*E<3,1))+ .2) --2. *E ( 6, 1 > ) *U32
+- ( E < 6 , DB=2.*(U3*E(5,1)-
U1*E(2,1))*(U3*(E(5,2)-E(5,1))-Ul*<E<2,2l-E(2,11 +)))+U2*(CE-2,2.*(1,2>1)-*EC 1))*E<3,1)+ + < E ( 6, 2) -E
(I::.,, l )) *E < 1 DC= ( E ( 1 DC=DC4(E(1,1)*E(6,1)-E(3,1>**2)*EC4,2)
, 1 ) )
, 2) *E ( 6, 1 ) +E < 1 1 ) *,E ( 6, 2) -2. *Э ( 3, 1 ) *Э ( 3, 2) ) *Э ( 4, 1 )

DC=DC+E(5.1l*(E(1,2)*E<5.1)+2.*E<1.1>*E(5.2)+ 2) +:2. *Э ( 2, 2) *Э (:3,
·тЭ ( 2, 1 ) ·лл·Э < :; 1) )
DC=DC+-E(2,1) <E(6,2)*E(2,1)+2.*EC6,1)*E<2,2)+
+Э(5.1л*Э(3.2)+2.*Э(5.2)*Э(3.1))

DX=((U2-E(4,1))*DA-(2.*U2+E(4,2))*A-DB DC)/XX<1>
ЕСЛИ<KOL.LE.2> ВОЗВРАТ DZ:::((I., 0. 1
ЕСЛИ ( ZZ ( 1 ) •
УРАВНЕНИЕ 0. I ПЕРЕЙТИ К 6
****** Z-ПРОИЗВОДНАЯ ДИСПЕРСИОННОЙ ФУНКЦИИ******
DA=U12*E(1,3)+U13*<E<3,3)+E(3,1))+U32*(E(6,3)+2.*E<6,1))
DB=2.*(U3*E<5,1)-U1*E(3,1))*(U3*(E(5,3)+E(5,1))-U1*E<2,1))+ t-2.*U32*(E11,11*Et6,1)-
E(3,1)**2)+ +U2* ( E ( 1
, ::: )·*E ( 6, 1 ) +E ( 1 , 1 ) *Э ( 6, 3) --2. *E < .:: ,1 ) 1}E ( 3, 3) )
DC=CEl1,3)*EC6,1)+E(1,1)*E(6,3)-2.*E(3,1)*E(3,3))*E(4,1>
DC=DC:+ ( E ( 1, 1 ) *E ( 6, 1 ) -E <:::, 1) **2) *E ( 4, 3)
DC=DC+E(5.1l*CE<1.3)*E(5.1)+2.*E(1.1)*E<5.3)+
+EC2,1)*E(3,3)+2.*E(2,3)*E(3,1))
DC=DC+E(2,1)*(E(6,3)*E(2,1)+2.*E16,1)*E<2,3)+
+E(5,1)*E(3,3)+2.*E(5,3)*E(3,1))

DZ=< (U2-E(4,1))*DA+(2.*U32-E(4,3l)*A-DB+DC)/ZZ(1)
6 ЕСЛИ(KOL.LE.3> ВОЗВРАЩАЕМ ****** P-
ПРОИЗВОДНУЮ ДИСПЕРСИОННОЙ ФУНКЦИИ****** [Ip:::: ( 0.
, 0. )
ЕСЛИ<PP<t>.EQ.O.) ПЕРЕЙТИ К 7

DA=U12*<E<1,4)+2.*EC1,1))+U13*(E(3,4)+E(3,1))+U32*E<6,4)
DB=2.*(U3*E(5,1)-U1*E(2,1))*(U3*E(5,4)-U1*<EC2,4>+E(2,1)))+ +2.*U12*(E(1,1)*E(6,1)-E(3,1)**2)+

+U2* ( E ( 1 , 4 >*EC:-, 1 ) +Э ( 1 1 ), *EC:,, 4 ) -2. *Э ( :;:: ·• 1 ) *Э < 3, 4) )
DC= ( E ( л , л\.} *E ( 6, 1 ) +E ( 1 1, ) *E ( 6 • 4) --2. *E ( ::: 1 ) *E < :";:, 4) ) *E < 4, 1 )
[!C=DC+ ( E ( 1 1,) ll-E ( 6 1 ).,-E ( 3, 1 ) ·** 2) *И ( 4, 4)
DC=DC+E(5,1)*(E(l,4)*E(5,1)+2.*EC1,1)*E(5,4)+
E(2,1)*E<3,4)+2.*E(2,4)*E(3,1))
DC=DC+E(2,1)*(E(6,4)*El2,1)+2.*E(6,1)*E(2,4)+
+E(5,1l*EC3,4)+2.*EC5,4)*E(3,1))
Г

DP=< 1. u:::--E < .q., 1 > ********; *DA·+ c 2. *U12-E < 4. L1 > > *?'1··DB+1:.ic >;pp< 1 >
ВЫЧИСЛИТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ********
7 У 13::::У 1. :: /2"
ЕСЛИ(U13.EQ.O.) ПЕРЕЙТИ К 8 1 ) )
A:.=: ( 1.!"32 ·· E ( 1 B , *E ( 5, 1 ) -( U 13+E ( 3, 1 ) ) - ,E ( 2, l )
=--0 ? I < < U 1 i:: + E .:: ,j > ) * ( U 2 -E ( 4 (.:,.::A/ ( ( U , 1 ) ) + И ( 5 , 1 ) * E ( 2 , л ) )
1 "::+F ( :: P1:::: 1. , 1 l > ll-E ( ,:, ,1 ) ··-( U 1 :2'.·-E (I:,, J ) i r,E ( ,1 ) )

GOTO 10
```

```
8 IFCCABS<U2-E(6,1)).LT.1.E-3) ПЕРЕЙТИ К 9
   A=1.
   B= < O. 1. >
   C=CABS<E<1,1)-U32+B*E<2,1))
   ЕСЛИ<CABS(E(1,1)-U32-B*E(2,1)).LT.C) B=<0.,-1.)
   ЕСЛИ(U3.EQ.O.> B=-E(1,1)/E(2,1)
   C=O.
   ПЕРЕЙТИ К
,10 A=O.
   Б=O.
   C=л.
10 Q=A+B*CONJG(B)+C*CONJG(C)
   Q=::::C!RT CO )
   ЭФЛ ( 1) =Кондиционер!
   ЭФЛ< 2 > =Б/C!
   ЭФЛ<::::) =C/Q
   V=1./299.7925
C     ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ СОСТАВЛЯЕТ 1 МВ/М. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ БУДЕТ В ГАММЕ.
   БФЛ(1)=-V*U3*ЭФЛ(2)
   BFL<2>=V*<U3*EFL(1)-U1*EFL(3))
   BFL(3)=V*U1*EFL(2)
   КОНЕЦ
```

VII. Основная программа и ввод/вывод

ПРОГРАММА WHAMP

Основная программа, описанная здесь, в основном предназначена для используется в общих обзорах дисперсионного соотношения для различных -векторов и параметров плазмы. Описание довольно краткое, опускает множество технических деталей и скорее подчеркивает моменты, которые существенны для любой программы, вызывающей SUBROUTINE DIFU. В частности, оно должно быть полезным в качестве примера или отправной точки при написании специализированных программ для конкретных приложений.

Взаимодействие между программой и пользователем осуществляется через процедуры ввода/вывода, описанные в следующем параграфе. В процедуре ввода TYPIN могут быть изменены параметры плазмы. Начальное значение XOI для частоты должно быть указано там, а также волна

числа, для которых требуется решить дисперсионное уравнение. Компоненты волнового вектора задаются массивами PM kL "1 /Q1 и ZM, а в общем прямоугольником PM (1) случае PM (2) и ЗМ(1) к11 в1 /Q1 ZM(2) в -плоскости покрыта сетка с размером сетки PM(3) по ZM(3). Если значение PZL установлено равным единице в SUBROUTINE TYPIN, PM и ZM интерпретируются как логарифмы волновых чисел, то есть PM(1)

log(kL V/Q1) :S PM(2) и т.д. Размер сеток тогда будет изменяются логарифмически.

В первом разделе кода есть ряд переменных учитывая их правильно нормализованные значения и плазменные параметры метры печатаются. Номер последнего компонента с ненулевой плотностью сохраняется в переменной JMA, которая появляется как аргумент в вызове DIFU. Большая часть коммуникации между основной программой и ПОДПРОГРАММОЙ DIFU происходит через общие области /XPZ/ и /COUT/. Переменные в /XPZ/:

ХХ(Дж) = w /rt J, FLEX). нормированная частота компонента J (COM-

ПП(J) = к Дж. VJ/0.J, нормализованное перпендикулярное волновое число.

zz (J) = k11 V j nJ, нормализованное параллельное волновое число.

А(Дж) = a1J (см. уравнение II-8). a2J

Б(Дж) = (см. уравнение I I-8). (см.

Д(Дж) = уравнение II-8).

J

АСС(Дж) = частица масса в единицах массы протона.

Масса электрона принимается равной нулю.

ВД(Дж) = VdJ, нормализованная скорость дрейфа (см. уравнение II-8).

ДН(Дж) = плотность числа частиц/м 3 = температура в .

ТА(Дж) кэВ. = w Дж/w2 (см. уравнение

ХР(Дж) II-6) (КОМПЛЕКС). = c/V1, скорость света/тепловая

резюме скорость первого компонента

нет.

Этим переменным должны быть присвоены их правильные значения для JMA до вызова

Дж. SUBROUTINE DIFU. Остальные переменные не используются DIFU, но они необходимы для связи с TYPIN. XC — это электронная гирочастота в кГц, а PM, ZM, XOI и PZL обсуждались выше.

Результаты из SUBROUTINE DIFU возвращаются через общую область /COUT/, которая также используется для передачи данных.

результаты в выходной процедуре OUTPT. Переменные в /COUT/

являются:

Х = w/0.1 (КОМПЛЕКС)

п = к Дж. B1/0.1

С = k11 V1/D1

английский как электронный = Компоненты электрического поля (Уравнение VI-7). 1 мВ/м. ИЭФЛИ =

Циркулярно поляризованная часть поля вращается в правом направлении,

если Im EFL(2) > O

(СЛОЖНЫЙ).

БФЛ = Компоненты магнитного поля .in у (КОМПЛЕКС)

ТЫ = Значение дисперсионной функции D(wu лс) (С-

ПЛЕКС) .

ДЕСЯТЬ = n1 в/3ж (СЛОЖНЫЙ)

оно говорит = Д 1 (В а Д / а клл (СЛОЖНЫЙ)

ОКУНАТЬ = a,;v,aD/aki = (6, (СЛОЖНЫЙ)

EPS 4)-массив, содержащий производные x a, / (B ,) и его

a x, за / аз, и пас:: / ап

(СЛОЖНЫЙ)

VG(I), I=1: Перпендикулярная группа veclociy/V1-

I=2: Параллельная групповая скорость/V1.

SG(I) = Im x/VG(I). Может использоваться для оценки пространственного

темпы роста.

РИ = kc/ui, показатель преломления (КОМПЛЕКСНЫЙ).

Когда DIFU вызывается с первым аргументом, равным двум,
возвращаются значения DIR и DIX. Используя метод итерации Ньютона, я с
коррекция.

ex= ДИР/ТЕНДЕНЦИЯ (VII-1)

вычисляется, и улучшенное приближение к решению дисперсионного соотношения получается путем замены X на x-cx. Этот процесс повторяется до тех пор, пока \ex\ 10-6\x\.

Устанавливая первый аргумент равным четырем, мы делаем еще один вызов SUBROUTINE DIFU, которая возвращает значения DIR, DIX,
DIZ и DIP, а также EFL и BFL. Вносится последняя коррекция частоты, и вычисляются значения VG, SG и RI. Результаты печатаются в SUBROUTINE OUTPT.

Когда решение дисперсионного соотношения находится при одном значении !s, волновой вектор увеличивается на /'::. как предписано параметром KFS в TYPIN.
Если KFS = 1, PM(3) добавляется к P, в то время как ZM(3) добавляется к Z, если KFS = 2. Новый
Начальное приближение для частоты рассчитывается как w -
f::.5•clw/at, и итерация начинается снова. Это повторяется до тех пор, пока дисперсионное соотношение не будет решено во всех точках, указанных PM и ZM. Затем управление возвращается к
пользователь вызывает SUBROUTINE TYPIN.

```
ВРЕМЯ= 82/06/14 - 14.30.49

ПРОГРАММА WH{,MP
КОМПЛЕКС X,XO,XVO,XX(6),XP(6),DX,OME,FPX,DIR,DIX,DIZ,DIP, *
  EPS(6,4),DOX,DOZ,DOP,CX,EFL(3),BFL(3),Rl
РАЗМЕРЫ ДОЖДЬ(6),T(6),СТ(6),ИСП(6),ТИД(7)
ПЕРСОНАЖ SPE*3 (5)
ОБЩИЙ /XPZ/ XX,PP(6),ZZC6),A(6),B(6),D(6),ASS(6),VD(6),
      ДНКА>,TA(6),XP,CV,PM(3),ZM(3),XOI,XC,PZL
ОБЩИЙ !COUT/ X,P,Z,EFL,BFL,DIR,DIX,DIZ,DIP,EPS,VG(2),SG(2),RI ДАННЫЕ DN/6.0E6,0.0E6,0.E6,0.,0.,0./,

# TA/ . 00 1 • 001 /1.0, 0.0, 1.0, # A/0.1, 0.1, 1.1, 1.0, 1.0, 1.0,
B/0 .. 10,0.10,0.10,0.10,0.10,0.10/, / 0. т.!: P,:7:;:7:; 0. 0.

               ,       ,  (я. ,       , 0.  , 0. /,
# ВД/ O.        , это.  , 0. 0, O.    , 0.  , 0. /,
# XC /: :. 30/
  flhTA :=:::PE/ E-        . ,  H+ ·,··HE+', ··o+ ···,···            ··· /

  NPL=O
1 DEN==O.
  ПЕД==().
  DO 2 ,.J= 1, 6
  REN<J)=1836,1*ASSCJ)
  ЕСЛИ<REN(J).EQ.O.) REN(J)=l. ·r {._I ) =TA
  ( ,_I ) / TA ( 1 )
  ISP<J>=SQRT(ASSCJ)J
  JF(ISP<J>.LT.4) ISP(J)=ISP(J)+l
  1F(DN<J>.LE.O.) GOTO 2 , .IMfr==,..I

  RE[1===PED+DN ( ,J) /F:EN (,_I)
  ЕСЛИ(ИСП(J).УР.1) ДЕН=ДЕН+ДН(J)
2 ПРОДОЛЖИТЬ

  PH=PEH(i)
        **** НОРМАЛИЗОВАННЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ. ****
  DO ::: ,J== 1, ,JMt
  REN(J)=REN(J)/RN T ( ,J) =T
  ( ,.J) *REN ( ,J)
  CT(J)=КОРЕНЬ<T<J>>

  ДХ·:::-, 12405.
  PFG!=RED/DEV
  PX='.::;C!RT ( PFO >
  XA::::X(./RN
  1F(,:::TA ( 1) /RN
  (V=TR*(1022.+TR>l(511. + TR)**2 CV= 1. /::DRT
  (CV)
  DH:==DEK tt-HN
        ****        ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ.      ****
  ВЫЗОВ ЧАСОВ(ITID>
  ПЕЧАТЬ 100, ( ITID<::?.-I), !=1,6)
100 ФОРМАТ(* ДАТА *,I4,*-*,J2,*-*,J2,* ПЕЧАТЬ 101,PX,XC,DEN  TIME:*,J2,*.*,J2,*.*,J2,/)

101 ФОРМАТ<* ЧАСТОТА ПЛАЗМЫ:*F8.3*КГЦ ГИРОСКОП #  FREQ.:*F8.3*KHZ    *
    *ПЛОТНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ:*E9.3*M-3*/)
  DO 4 ,.J= 1 , ,JMr,
1U2 ФОРМАТ(* *A3* DN=Ii-E9.3* T=*F7.4* D=*F4.2 #* A=*F4.2* B=*F4.2*
    VD=*F6.2/)
4 ПЕЧАТЬ 102, SPE(ISP(J)), DN(J), TA<J>, D(J>, A(J), B(J>, VD(J)
```

```
      ЕСЛИ(NPL.EQ.1) ПЕРЕЙТИ К 6 ****
C                 ЗАПРОСИТЬ ВВОД! **** 5 ВЫЗОВ TYPIN(NPL,KFS>
    ЕСЛИ(NPL.EQ.1) ПЕРЕЙТИ К 1

    Я:., НПЛ=::O
      КВ::::л
      ПУ)=:ПМ ( 1 )
      ЕСЛИ(PM(3l.LT.O.) PLG=PM(2) f'::::PLG ZLG=:ZM ( 1 >

      ЕСЛИ(ZM(3).LT.O.)
      ZLG=ZM(2) l==ZLG ЕСЛИ(PZL.NE.1.) ПЕРЕЙТИ К 7 P=
      10. 1H!
      ·PL.G 7=10. · *ZLG 7 X=XOI 10 OME=(X*XA)**2
      FPX=PFC!/OME ДО 1
      1 ,J:::: 1 , ,JMA XX ( ,J)
    ==X *REN (,_I)
   pp ( ,J) =·P*'.:::::T < .J)

      ZZ (,J)=Z*CT(,J)
   11 XP(J)=DNIJ)/DEC/RENCJ)/OME

      ВЫЗОВ DIFU(2,JMA,IERR)
      ЕСЛИ(IERR.NE.0) ПЕРЕЙТИ К 50 ****
(                 НАЧАЛО ИТЕРАЦИЙ. ****
      ДО 20 1=1,20 ? ДИ
      Ф-:=КАБ'.:; (ТЫ)
      ЕСЛИ:K=O
      CX=DIR/DIX 15
   X==:<--1:X
      OME.=(X*XA>**2
      FPX=PFG!/OME DO
      16 ,J=1, ,.JMA XP(J)=DN(J)/
      DEK/RENCJ)/OME 16 XX*X=X=1

      ЕСЛИ(CABS(CX).LE.1.E-6*CABS(X)) ПЕРЕЙТИ К 30 ВЫЗОВ DIFUC2,JMA,IERR>
      ЕСЛИ<IERR.NE.0) ПЕРЕЙТИ К 50
      IFCCABS(DIR).LT.ADIR) ПЕРЕЙТИ К 20 X=X+CX
      CX=CX/2.

      IRK=IRV+l
      ЕСЛИ(IRK.GT.20) ПЕРЕЙТИ К 25 ПЕРЕЙТИ К
      15 20
   ПРОДОЛЖИТЬ

   25 ПЕЧАТЬ 105,P,Z,X,I,IRK 105 ФОРМАТ<2X,*НЕТ
  СХОДИМОСТИ!*/* KP=*,F6.3,* KZ=*, + F6.4,* X=*,E12.2,E12.2/* I=*,13,* IRK=*,13/)

      C:iCtTC1 5 5
                  **** КОНВЕРГЕНЦИЯ! ****
   30 ВЫЗОВ РАЗЛИЧНОГО<4,JMA,IERR>
      ЕСЛИ<IERR.NE.0) GOfO 50 X=X·····DI -:;:;
      [I]X

      XI =:P1JMt1Ci (X)
      \Jl'ii l l"0··D lF'/U1X l)(; ( 2 l:::
      Tt I l I [IJ X
      PJ ccc: ;(ifn ( F' 1rn:2 +-Z-¾·*2) *CV/ X
```

Machine Translated by Google


```
      ЕСЛИ(VG<1>.NE.O.) SG<l>=XI/VG(1)
      TF(VG(2).NE.O.) SG(2)=XI/VG(2)
Г:             **** РАСПЕЧАТАЙТЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.              ****
  :::4 ВЫЗОВ OUTPT
      PO=P

      zo,==z :<O==X ЕСЛИ(KV.EQ.0) ПЕРЕЙТИ К 35
      XVO=X
      Z\JO=Z
      ZL.O=ZLO
      1-:• JU=P
      f-'LO=PLG
      ncn<=Drx
      DOZ=DIZ
      flOP:::::[IIP
      KV=0
  J5 0010(36,38) КФС ::6
   ПЛГ=ПЛГ+ПМ < 3)
(.                **** ОБНОВЛЕНИЕ P И Z.                ****
      ЕСЛИ(PLG.GE.PM<1>.AND.PLG.LE.PM(2)) ПЕРЕЙТИ К 39 ZLG=ZLG+ ZM ( :3 >

      ЕСЛИ<ZLG.LT.ZM(1).0R.ZLG.GT.ZM(2)) ПЕРЕЙТИ К 5 <V==l PLG=PLO P=PVO 37

  Z=ZLG+PZL*(lO.**ZLG-ZLG)
      ПЕРЕЙТИ К 40
я_.
  38 ЗЛГ=ЗЛГ+ЗМ(3)
      ЕСЛИ(ZLG.GE.ZM<1>.AND.ZLG.LE.ZM<2)) ПЕРЕЙТИ К 37 PU3=PLG+PM < : :)

      ЕСЛИ<PL.G.LT.PM(1).0R.PLG.GT.PM<2)) ПЕРЕЙТИ К 5 :V=l ZLG==ZLO Z=ZVCt 39

  P=PLG+PZL.*(10.**PLG-PLG> **** НОВАЯ ЧАСТОТА
Г                    НАЧАЛА. ****
  40 ЕСЛИ(КВ.УР.0) ПЕРЕЙТИ К 41 ДВП=П--ПВО
      Д1<Z=З-ЗВО

      DX=(ДКП*ДОП+ДКЗ*ДОЗ)/ДОКС X=XVO-·DX
      ПЕРЕЙТИ К 10
      41 Д1<П=П--ПО
  Д :: Z=Z= Д Д-З '. ХО О-
      DX OOTO 10

  50 ПЕЧАТЬ*, ро СИЛЬНО ЗАМОРОЖЕН!
      ПЕЧАТЬ*,··
      IERR=-0 55
  ЕСЛИ(KFS.EQ.1) PLG=1.E99 ЕСЛИ(KFS.EQ.2) ZLG=1.E99
      ПЕРЕЙТИ К :3:'i r .o ПРОДОЛЖИТЬ КОНЕЦ
```

ВХОД/ВЫХОД

Идея, лежащая в основе процедур ввода/вывода, заключается в том, чтобы обеспечить максимальную гибкость при минимальном наборе текста. Эта версия кода написана для компьютера NORD, и поскольку некоторые детали зависят от машины, могут потребоваться изменения, если программа переносится на другой компьютер. Однако описанная здесь схема ввода/вывода была признана очень полезной, и реализация подобных процедур

можно рекомендовать.

При вызове подпрограммы TYPIN пользователю предлагается ввести данные в программу с помощью подсказки "INPUT:". Ответив "H" (HELP!), он выведет на экран следующую распечатку:

СТРОКА ВВОДА МОЖЕТ СОСТОЯТЬ ДО 80 СИМВОЛОВ.
ФОРМАТ Ji::;:
NAME1=V11,V12,V13, ... NAME2=V21,V22, ...
НАЗВАНИЕ ИМЕНА ВЫБРАНЫ ИЗ СПИСКА:

ИМЯ	ПАРАМЕТР
А< Я)	ПАРАМЕТР ALPHA1 В РАСПРЕДЕЛЕНИИ. (1) — ЭТО НОМЕР КОМПОНЕНТА, 1=1 - 6.
Б< Я)	ПАРАМЕТР АЛЬФА2 В РАСПРЕДЕЛЕНИИ.
С	ЭЛЕКТРОННАЯ ЦИКЛОТРОННАЯ ЧАСТОТА В КГЦ.
Д < Я)	ПАРАМЕТР ДЕЛЬТА В ЧАСТОТЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, НАЧАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ
Ф	ИТЕРАЦИЙ.
Л	L=l ПАРАМЕТРЫ P И Z ИНТЕРПРЕТИРУЮТСЯ КАК ЛОГАРИФМЫ ВОЛНОВЫХ ЧИСЕЛ. ЭТА ОПЦИЯ ПОЗВОЛЯЕТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ШАГИ. L=O ЗНАЧЕНИЕ ПО УМОЛЧАНИЮ. ЛИНЕЙНЫЕ ШАГИ.
М(л)	МАССА В ЕДИНИЦАХ МАССЫ ПРОТОНА.
Н <Я>	ЧИСЛО DEN ; I TY В ЧАСТИ. /КУБИЧЕСКИЙ МЕТР ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫЕ
п <Я>	СОСТАВЛЯЮЩИЕ ВОЛНОВОГО ВЕКТОРА. P(1) — НАИМЕНЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ, P<2> — НАИБОЛЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ, P(3) — ПРИРАЩЕНИЕ.
S	STOP ЗАВЕРШАЕТ ПРОГРАММУ.
Т (Я)	ТЕМПЕРАТУРА В КЭВ СКОРОСТЬ
V(I)	ДРЕЙФА/ ТЕПЛОВАЯ СКОРОСТЬ.
з (я)	Z-КОМПОНЕНТА ВОЛНОВОГО ВЕКТОРА. I ИМЕЕТ ТАКОЕ ЖЕ ЗНАЧЕНИЕ, ЧТО И ДЛЯ PCI).

ИМЯ БЕЗ ИНДЕКСА ОТНОСИТСЯ К ПЕРВОМУ ЭЛЕМЕНТУ. «А» — ЭТО
THU'.З СООТВЕТСТВУЕТ ЗНАЧЕНИЮ::: V 11 IA(V12, 1.1МОЖЕТ БЫТЬ УКАЗАН В I-, F-, ORE-ФОРМАТЕ, РАЗДЕЛЕННЫМ ЗАПЯТОЙ<,>.
11 = 11 I'.::: НЕОБЯЗАТЕЛЬНО, НО ДЕЛАЕТ I t'-IPUT БОЛЕЕ ЧИТАЕМЫМ.
ПРИМЕР: ВХОД: Al., 2. B<::::). 5, P==. l,. 2·, 1. E--2 TH I'.::; :::Ef '.::; A< 1):::: 1.
, A< 2) =-2. , В (:".::) =. 5, P (1) =. 1 И PC3) , П (2) =. 2,
= .01. ЕСЛИ ПРИРАЩЕНИЕ P(3)/Z(3) ОТРИЦАТЕЛЬНО, ТО P/Z СНАЧАЛА БУДЕТ УСТАНОВЛЕНО В P(2)/Z(2), А ЗАТЕМ УМЕНЬШЕНО ДО P(1)/2(1: ПОСЛЕДНЕЕ УКАЗАННОЕ ИЗ P И Z БУДЕТ ИЗМЕНЯТЬСЯ В ПЕРВУЮ ОЧЕРЕДЬ.

ЕСЛИ БУКВА CW I БЕЗ l)ALUE) I'.::; ВКЛЮЧЕНА, ВЫ БУДЕТЕ ПОПРОСИТЕ УКАЗАТЬ НОВЫЙ ФОРМАТ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ.

ВХОД:

Переменные, не указанные во входной строке, как правило, сохраняются их старые значения. Обратите внимание, однако, что переменные P и Z (соответствуют PM и ZM в основной программе) - это некоторые чем отличается в том смысле, что указание P(1) или Z (1) может изменить значения P(2), P(3) или Z(2), Z(3).

Эффект спецификации типа «P = P1, P2, P3» удобно представить как «DO P = P1, P2, P3» с кон-

изобретения, которые

а) Если указан только Pl, цикл выполняется один раз с
П = П1.

б) Если указаны Pi и P2, но не P3, то цикл
выполняется дважды с P = P1 и P = P2.

Такая же интерпретация дается параметру Z.

Первый раз, когда выполняется TYPIN, или если буква O появляется в строке ввода, осуществляется вызов записи точка INOUT в SUBROUTINE OUTPT. Печатая "OU'rPUT:", эта процедура просит пользователя указать формат вывода.

Ответ «H» снова поможет, сделав следующую распечатку появляться:

ВЫХОД:H

ВЫХОД ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ СТРОКОЙ БУКВ:

А	ВСЯ ДОСТУПНАЯ ПРОДУКЦИЯ.
Б	КОМПОНЕНТЫ ВОЛНОВОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.
[Я	ДИСПЕРСИОННАЯ ФУНКЦИЯ И ЕЕ ПРОИЗВОДНЫЕ.
И	КОМПОНЕНТЫ ВОЛНОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.
Ф	ЧАСТОТА!
Г	СОСТАВЛЯЮЩИЕ ГРУППОВОЙ СКОРОСТИ.
п	ПЕРПЕНДИКУЛЯРНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ВОЛНОВОГО ВЕКТОРА.
Р	ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ.
S	ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ТЕМПЫ РОСТА.
Т	ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕНЗОР И ЕГО ПРОИЗВОДНЫЕ.
с	Z-КОМПОНЕНТА ВОЛНОВОГО ВЕКТОРА.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЫЧНО ПЕЧАТАЮТСЯ НА ОДНОЙ СТРОКЕ В ТОМ ПОРЯДКЕ, В КОТОРОМ ОНИ УКАЗАНЫ. НОВАЯ СТРОКА I'.::; ПОЛУЧАЕТСЯ С ПОМОЩЬЮ lN'.:::EFnINO A "/" B !:HRINCi.

ПРИМЕР: ВЫХОД: PZF/E ВОЛНОВЫЕ
ЧИСЛА И ЧАСТОТА ПЕЧАТАНЫ НА ОДНОЙ СТРОКЕ.
И КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СЛЕДУЮЩЕМ.

ВЫХОД:

Это должно позволить пользователю выбрать подходящий выход. формат.

```
C               ВРЕМЯ= 82/06/14 - 14.30.49

                ПОДПРОГРАММА ТИПИН<NPL,KFS)
C                               АРГУМЕНТЫ: НПЛ                    НОВАЯ ПЛАЗМА. ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРА ПЛАЗМЫ NPL
C                                                                 УСТАНАВЛИВАЕТСЯ В 1.
C                                                   КФС           =1 П УКАЗАНО ПОСЛЕДНИМ.
                                                                  =2 Z УКАЗАНО ПОСЛЕДНИМ.
                СИМВОЛ INP*80,IC*1 ОБЩИЙ /XPZ/
                МАССИВ(88)
                ДИ МЭНЬ.:; Я НА ТВ < 2 )
                ДАННЫЕ I OU r /2/, KP, KZ / 1, 1 /,ARRAY< ::::8) /0. I **** СООТВЕТСТВИЕ
C       МЕЖДУ   МАССИВОМ И ИМЕНАМИ В WHAMP:                                                ****
МАССИВ C(IOF+ 0 12 18 24 30 36 42 48 54 60 66 78 79 82 85 86 87
C                             XX PP ZZ ABD ASS VD DN TA XP CV PM ZM XOI XC PZL
C
        1       IV= 1000
                ПЕЧАТЬ 2 2
            ФОРМАТ(/*$INPUT: *> F:EAD :3, I NP
                .3 ФОРМАТ <
            Af:::C> )
                NC::.--=0 4
            NC==NC+l
                ЕСЛИ<NC.GT.80) ПЕРЕЙТИ К 6
                IC=INP<NC:NC)
                IFCIC.EQ. ') ПЕРЕЙТИ К 4
                IS=ICHARCIC).AND.1778
C*¾* "!'.::;" I:;; ЦЕЛОЕ ЧИСЛО, СОДЕРЖАЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИМВОЛА A:::CII IC *1,:1.
                ЕСЛИ<IS.LT.47B) ПЕРЕЙТИ К 4
                ЕСЛИ<IV.GT.88) ПЕРЕЙТИ К 7
                ЕСЛИ<IS.GE.101B.AND.IS.LE.1328) ПЕРЕЙТИ К 6 IFCIS.LE.57BJ ПЕРЕЙТИ К 5
                ЕСЛИ(IS.GE.72B.AND.IS.LE.100B) ПЕРЕЙТИ
                К 5 ЕСЛИ(IS.GE.133B) ПЕРЕЙТИ К 5

C
                TV<IE)=TVCIE>*DEK+(IS-60B)*DEC DEC=DEC*DEI<./ 10.

                N'v'=1
                ПЕРЕЙТИ К 4
C
            5 ЕСЛИ ( IC. NE. . , ·· ) ПЕРЕЙТИ К 10 6
            ЕСЛИ(NV.NE.1) ПЕРЕЙТИ К 7
                ЕСЛИ(IOF.GT.6) ПЕРЕЙТИ К 25
                ЕСЛИ<IOF.GT.3.AND.IV.GT.66) ПЕРЕЙТИ К 25
                ЕСЛИ(IOF.GT.1.AND.IV.GT.85) ПЕРЕЙТИ К 25 ЕСЛИ(IC.EQ. E')
                ПЕРЕЙТИ К 9
                МАССИВ(IV+IOF)=TV(1)*10.**TV(2)
                10F=IOF+1
                ЕСЛИ<IV.EQ.79) KP=IOF
                ЕСЛИ(JV.E0.82) KZ=IOF
C
            7 ЕСЛИ(NC.Gl.80) ПЕРЕЙТИ К 50 DEK=1

                DEC=1.
                TB( 1 J==O.
                TB ( 2) ::::().
                NV=O
                ff:::1 IF
                ( IC. EGI. ·· IV=IOOO,    . ) ПЕРЕЙТИ К 4
                IOF=l
                IFCIC.EQ.
                A) IV=24
```

```
ЕСЛИ<IC.EQ. B > IV=30 ЕСЛИ (IC.EQ. ·'C·')
IV=86 ЕСЛИ (IC.EQ. ··Tr') IV=36 ЕСЛИ<I .EQ.
F') IV=85 IFCIC.EQ. H > ПЕРЕЙТИ К 30
ЕСЛИ (re.EC!. ·'L···) IV=87 ЕСЛИ< IC.EC!.
'M' > IV=42 ЕСЛИ (IC.EQ. ··· N ··· ) IV=54
ЕСЛИ(IC.EQ. o ) ПЕРЕЙТИ К 8
ЕСЛИ(IC.EQ.···p···) IV=79 IFCIC.EQ. S' )
СТОП ЕСЛИ (IC.EC!. ··· T ·' ) I V=60 ЕСЛИ<
IC. EC!. ·'v,·) IV=48 ЕСЛИ<IC.EQ.'Z > IV=82

C
      ЕСЛИ<IV.GE.1000) ПЕРЕЙТИ К 27
      ЕСЛИ<IV.LT.66.0R.IV.EC!.86) NPL=l ЕСЛИ(IV.EQ.79)
      KP=l ЕСЛИ<IV.EQ.79) KFS=l
      ЕСЛИ<IV.EQ.82l KZ=1
      ЕСЛИ<IV.EQ.82) KFS=2 G(ITCI
      4
C
    f: IUUT=--:O
      GCJTO 4
C
    9 ЕСЛИ=.2
      DE t-:::= Hl.
      DEC:=1.
      нет 4
C
   10 ЕСЛИ(ИС.НЕ.'-') ПЕРЕЙТИ К 11
      ЕСЛИ(TV(IEl.NE.O.) ПЕРЕЙТИ К 20 DEC=-·DEC
      ПЕРЕЙТИ К 4
C
   11 ЕСЛИ (IC. NE .        ·  ·  ··· ) ПЕРЕЙТИ К 12
      ЕСЛИ(ABS(DECl.NE.1.) ПОЛУЧИТЬ 20
      DEC=DEI< / 1 O.
      DEC=DEC/10.
      t)OTO 4
C
   12 ЕСЛИ(IC.NE.')') ПЕРЕЙТИ К 4 ЕСЛИ(DEC.NE.1.)
      ПЕРЕЙТИ К 20 ЕСЛИ(IE.NE.1.0R.TV(l).LE.O.)
      ПЕРЕЙТИ К 20 IOF=TV(l)+.1 TV< 1 > =C>. tN=O ПЕРЕЙТИ К 4

C
   20 ПЕЧАТЬ 21,IC 21
   ФОРМАТ(* { НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ, ВЫЗВАННАЯ СИМВОЛОМ "*,Al,*"*)
   2:3 ПЕЧАТЬ 24 24
   ФОРМАТ<* ОСТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ СТРОКИ ИГНОРИРУЕТСЯ. ПОЖАЛУЙСТА, ПОПРОБУЙТЕ ЕЩЕ РАЗ!*)
      ПЕРЕЙТИ К 1
C
   25 TB(1)=ТВЦ1)*1    .**TB<2> PRINT "26, TB
      ( 1)
   26 ФОРМАТ<* ЗНАЧЕНИЕ*,E11.3,* НЕ ПОМЕСТИТСЯ В ПЕРЕМЕННОМ ПОЛЕ*>
      GOTO 23
C
   27 ПЕЧАТЬ*,·$ ПОМОЩЬ, ДА ИЛИ НЕТ?
```

```
      ЧИТАЙТЕ -it·, IC
      ЕСЛИ(IC.EQ./N/) ПЕРЕЙТИ К 1
30 ПЕЧАТЬ ::::1 31
ФОРМАТ<* СТРОКА ВВОДА МОЖЕТ СОСТОЯТЬ ДО 80 СИМВОЛОВ.*/
   F * ФОРМАТ:*/* ИМЯ1=V11,V12,V13, .••• ИМЯ2=V21,V22, ... ИМЯ*/
      * ИМЕНА ВЫБРАНЫ ИЗ СПИСКА:*//
   ФФ * ИМЯ *                  ПАРАМЕТР*/
   ФА(Ж)                       ПАРАМЕТР АЛЬФА1 В РАСПРЕДЕЛЕНИИ.*/ CI) - НОМЕР КОМПОНЕНТА, I=1 -
   Ф * Ф *                     6.*/
   Б<I> Ф * C * Ф              ПАРАМЕТР АЛЬФА2 В РАСПРЕДЕЛЕНИИ.*/
   DCI)                        ЭЛЕКТРОННАЯ ЦИКЛОТРОННАЯ ЧАСТОТА В КГЦ.*/
                               ПАРАМЕТР ДЕЛЬТА В РАСПРЕДЕЛЕНИИ*/ ЧАСТОТА, НАЧАЛЬНОЕ
   F * FF * L *                ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ИТЕРАЦИЙ.*/
   F * F * F *             L=1 ПАРАМЕТРЫ P И Z ИНТЕРПРЕТИРУЮТСЯ*/
   *    F                      КАК ЛОГАРИФМЫ ВОЛНОВЫХ ЧИСЕЛ. ЭТА*/ ОПЦИЯ ДОПУСКАЕТ
   * F * F                     ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ШАГИ.*/
   F FF *                  L=O ЗНАЧЕНИЕ ПО УМОЛЧАНИЮ. ЛИНЕЙНЫЕ ШАГИ.*/ МАССА В
     * *                       ЕДИНИЦАХ МАССЫ ПРОТОНА.*/ ПЛОТНОСТЬ ЧИСЛА В
   FS      МКИ)                ЧАСТИ./КУБИЧНЫЙ МЕТР*/ КОМПОНЕНТЫ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОГО
   ПЕЧАТЬ  НЦИ)                ВОЛНОВОГО ВЕКТОРА.*/ PC1) — НАИМЕНЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ, P(2) —*/
           PCI)                НАИБОЛЬШЕЕ ЗНАЧЕНИЕ, А P(3) — ПРИРАЩЕНИЕ.*/ СТОП! ЗАВЕРШАЕТ
   32 32                       ПРОГРАММУ.*>
   ФОРМАТ<
     F * V<I> * F
 Z<I> F * * F * F     *  T(Я)        ТЕМПЕРАТУРА В КЭВ*/ СКОРОСТЬ ДРЕЙФА/
                               ТЕПЛОВАЯ СКОРОСТЬ.*/ Z-КОМПОНЕНТА ВОЛНОВОГО ВЕКТОРА. I ИМЕЕТ*/ ТАКОЕ
                               ЖЕ ЗНАЧЕНИЕ, КАК И ДЛЯ P(I).*/ * НАЗВАНИЕ t,.JI БЕЗ ИНДЕКСА ОТНОСИТСЯ::; К ПЕРВОМУ
                               ЭЛЕМЕНТУ, "A II I::;; I
         ТАКИМ ОБРАЗОМ ЭКВИВАЛЕНТНО "A(l)". ЗНАЧЕНИЯ V11,V12, ..        МОЖЕТ БЫТЬ *Я
   F * УКАЗАНО В ФОРМАТЕ I-, F-, ORE, РАЗДЕЛЕНО ЗАПЯТОЙ(,).*/
   F -it· ПРИМЕР 11 :  =" I::; НЕОБЯЗАТЕЛЬНО, НО ДЕЛАЕТ ВВОД БОЛЕЕ ЧИТАЕМЫМ.   * /
         ВХОД:Al.,2. B(3).5,P=.1,.2,1.E-2*/ F
   F * ЭТО УСТАНАВЛИВАЕТ A(1)=1., A(2)=2., B(3)=.5, P<l>=.1, PC2)=.2,*/
   F * И P(3)=.01. ЕСЛИ ПРИРАЩЕНИЕ PC3)/Z(3) ОТРИЦАТЕЛЬНО, ТО P/Z*/
      *  СНАЧАЛА БУДЕТ УСТАНОВЛЕНА НА P<2}/Z(2), А ЗАТЕМ ПОНИЖЕНА ДО*
   FP(U/Z(l>*/ F ПОСЛЕДНЕЕ
   УКАЗАННОЕ ИЗ P И Z БУДЕТ ИЗМЕНЯТЬСЯ ПЕРВЫМ.*/
   FF * ЕСЛИ ВКЛЮЧЕНА БУКВА "0" (БЕЗ ЗНАЧЕНИЯ), ВЫ БУДЕТЕ ·li·/
   F * ПОПРОСИТЕ УКАЗАТЬ НОВЫЙ ФОРМАТ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ.*/)
      ПЕРЕЙТИ 1
50 ЕСЛИ(МАССИВ(86).GT.O. > ПЕРЕЙТИ 51 ПЕЧАТЬ*,/$
      НАЧАЛЬНАЯ ЧАСТОТА/
      READ*,ARRAY(86)
51 GOT0(52,53,54,55) KP 52 ПЕЧАТЬ*, $
PERP. ВОЛНОВОЙ ВЕКТОР НЕ ОПРЕДЕЛЕН!
      Гено 1 53
МАССИВC81)=МАССИВ(80)
54 МАССИВ<82)=МАССИВ(81)-МАССИВC80)
55 ЕСЛИ<МАССИВ(82).УР.О.) МАССИВ(82)=10.
      ГОТО (56,57,58,59) КЗ
56 ПЕЧАТЬ*,'$ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ВОЛНОВОЙ ВЕКТОР НЕ ОПРЕДЕЛЕН!/
      Гено 1 57
МАССИВ(84)=МАССИВ(83}
58 МАССИВ(85)=МАССИВ<84)-МАССИВ(83)
59 ЕСЛИ(АРРАВ(85).УР.О.> МАССИВ(85)=10.
      ЕСЛИ<IOUT.NE.1> ВЫЗОВ ВХОД IOUT=1
      F:ETURI\I
      КОНЕЦ
```

C ВРЕМЯ= 82/06/14 - 14.30.49

ПОДПРОГРАММА ВЫХОДНОЙ
СИМВОЛ 101..1*20 КОМПЛЕКСНЫЙ
X,EFL<3l,BFL(3),D1(4),EPS(6,4),RI ОБЩИЙ /COUT/ X,P,Z,EFL,BFL,DI,EPS,VG<2J,SG(2),Rl

C

K=O 1
K=K+1
ЕСЛИ(K.GT.KMX) ПЕЧАТЬ 6 ЕСЛИ<K.GT.KMX>
ВЕРНУТЬ IC=ICHAR(IOU(K:K)).AND.177B
ЕСЛИ<IC.EQ.57B) ПЕРЕЙТИ К 5 ЕСЛИ<IC.LT.100B) ПЕРЕЙТИ
К 1

IC=IC-100B
JF(IC.GT.32B) ПЕРЕЙТИ К 1
IB=IC: /9
ID=IC--IB*9+1 GOTO
(2,3,4) IB+l GOTO<l,10,18,
1,24,16,10,20, @ABCDEFG �3 GOTO (:I. 12, IJKLMNOP 1) ИД Н
C 1
, 1, 1 , 1 , 1, 1 , 1 , > ИД
C ГДж.
4 GOT0(26,22,2::::, 1, 1, 1, 1, 1, 14) ID R ; T LI VWX yz !:, ПЕЧАТЬ 6 ФОРМАТ<*
C *) 6 (30TO 1

C

1 ПЕЧАТЬ 11,X
(л 1 1 ФОРМАТ(*$ ЧАСТОТА=*,F7.4,E10.2,* •> ЕСЛИ(IC.GT.1> ПЕРЕЙТИ К 1
12 ПЕЧАТЬ 1::::, F'

1 ФОРМАТ(*$ P=*,F8.4,* *> ЕСЛИ<IC.GT. 1) ПЕРЕЙТИ
К 1 ПЕЧАТЬ 15, Z
14
1 ФОРМАТ(*$ Z=*,F8.5,* *> IF<IC.GT.1) ПЕРЕЙТИ
К 1 ПЕЧАТЬ 6 ПЕЧАТЬ 17,EFL.

11.:,
17 ФОРМАТ(*$ EX=*,F7.4,F8.4,* EY=*,F7.4,F8.4,* EZ=*,F7.4,F8.4,* *> ЕСЛИ<IC.GT.1> ПЕРЕЙТИ К 1 ПЕЧАТЬ 6 1:::: ПЕЧАТЬ 19,BFL 19
ФОРМАТ(*$ BX=*,F7.4,F8.4,*
BY=*,F7.4,F8.4,*
BZ=*,F7.4,F8.4,* *)

ЕСЛИ<IC.GT.1) ПЕРЕЙТИ К 1 ПЕЧАТЬ
6 20 ПЕЧАТЬ
21,VG 21 ФОРМАТ(*$
VGP=*,E9.2,* VGZ=*,E9.2,* *> ЕСЛИ(IC.GT.1) ПЕРЕЙТИ К 1 22 ПЕЧАТЬ I NT 2::::, :::a3 23
ФОРМАТ(*$ SGP=*,E9.2,*
SGZ=*,E9.2,* *> IFCIC.GT.1)
ПЕРЕЙТИ К 1 ПЕЧАТЬ 6 24 ПЕЧАТЬ 25,DI 25 ФОРМАТ(*$ D=*,2E10.2,* DX=*,2E10.2,*
DZ=*,2E10.2, DP=*,2E10.2,/)

F *
ЕСЛИ(IC.GT.1> ПЕРЕЙТИ К 1 26 ПЕЧАТЬ
27,F<I 7 ФОРМАТ(¾$ F:I=*,2E10.2)

ЕСЛИ(IC.GT.1) ПЕРЕЙТИ К 1

Machine Translated by Google


```
      ПЕЧАТЬ 6 , /:_,
  :3() ,J= 1 N= 1 +,J/ 4+,J/2/:!.[1(1

      M=.J-,..1 / 4*2-,J / 6 ПЕЧАТЬ
      29,<<N,M,EPS(J,l)),1=1,4)
  29 ФОРМАТ(*$ E*,2I1,*=*,2E10.2,* EX*,211,*=*,2E10.2, F *EZ*,2I1,*=*,2E10.2,* EP*,211,*=*,2E10.2,/)

  :30 ПРОДОЛЖИТЬ
      ПЕЧАТЬ 6
      ПЕРЕЙТИ К 1
C
      ВХОД ВХОД
  101 ПЕЧАТЬ*, $ ВЫВОД:'
      ЧИТАЙТЕ 102, ФОРМАТ
  IOU 10:2 (A20)
      ДО 10:3 <=-1, 20
      ЕСЛИ(IOU(K:K).EQ.' ') ПЕРЕЙТИ К 103 ЕСЛИ(IOU<K:K).EQ.'H')
      ПЕРЕЙТИ К 104 KMX= < 1 (>::: ПРОДОЛЖИТЬ F(ETURN

C
  104· ПЕЧАТЬ 105
  105 ФОРМАТ(* ВЫХОД ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ СТРОКОЙ БУКВ:*// ВСЕ ДОСТУПНЫЕ ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ.*/ КОМПОНЕНТЫ
     F * AF * B * FD            МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЛНЫ.*/
     F * _E F * FF *            ДИСПЕРСИОННАЯ ФУНКЦИЯ И ПРОИЗВОДНЫЕ.•/ КОМПОНЕНТЫ
     * FP * FRF * S  G          ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВОЛНЫ.*/ ЧАСТОТА.*/ КОМПОНЕНТЫ ГРУППОВОЙ
     * FT * FZ F                СКОРОСТИ.•/ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНАЯ КОМПОНЕНТА ВОЛНОВОГО
     F:E:3UL I'.::              ВЕКТОРА.*/ ПОКАЗАТЕЛЬ
     ОБЫЧНО                     ПРЕЛОМЛЕНИЯ.*/ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СКОРОСТИ
     ПЕЧАТАЮТСЯ                 РОСТА.*/ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕНЗОР И ПРОИЗВОДНЫЕ.*/ Z-КОМПОНЕНТА
     НА ОДНОЙ                   ВОЛНОВОГО ВЕКТОРА.*//
     СТРОКЕ В
     ТОМ ПОРЯДКЕ,
     КОТОРОМ* F  B
     * ОНИ*/* УКАЗАНЫ. НОВАЯ СТРОКА ПОЛУЧАЕТСЯ ВСТАВКОЙ A*

     F * 1 1 B СТРОКЕ.*/ * ПРИМЕР: ВЫВОД: PZF/E*/ F * ЧИСЛО
         WI-WE !:; И ЧАСТОТА ПЕЧАТАЮТСЯ НА ОДНОЙ СТРОКЕ, - /
     F
     F * И  КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СЛЕДУЮЩЕМ.*//)
      ПЕРЕЙТИ К 101
      КОНЕЦ
```

Machine Translated by Google

VIII. Обсуждение

В этом отчете сделаны следующие общие предположения:
о плазме и волнах:

а) Однородность

б) Частицы нерелятивистские

в) Функция распределения плазмы имеет вид (II-8)

г) Волны линейны

е) Частота (JJ является комплексной, но волновой вектор действителен)

f) Волны не слишком сильно затухают, т.е. Im w> -клл или
Я в > - Ре (01 - н) •

Помимо этого, нет никаких ограничений на w или k. Некоторые из вышеприведенных предположений могут быть еще больше ослаблены без особых усилий. Вместо уравнения (II-8) мы можем в с) взять любую линейную комбинацию максвелловских компонентов. Предположение е) можно, вероятно, опустить, если все переменные, связанные с k в программе, объявлены как COMPLEX. Это может быть желательно, если метод используется в программе трассировки лучей.

Основное приближение заключается в введении аппроксиманта Pad для функции дисперсии плазмы Z. Это заставляет нас сделать предположение f) выше и вызовет небольшие, но поразительные ошибки в Im w , когда частота почти действительна. На практике эти трудности не слишком серьезны, поскольку сильно затухающие волны обычно представляют ограниченный интерес, а слабые ложные «численные» нестабильности, которые иногда появляются, легко распознаются и не учитываются.

garded. Однако важно помнить об их существовании. Когда Im w> O, ошибка в аппроксиманте Pad пренебрежимо мала по сравнению с ошибкой в R(y,,\), которая составляет 5 10-6
P(y,A).

Хотя ошибки в основных функциях Z и R есть
довольно легко оценить, в общем случае очень трудно что-либо сказать о точности дисперсионной функции) или решения w (ls) дисперсионного уравнения.
Д(ш,

tion. Поскольку интересный случай — это D(l.tJ, !c) f::1 O, мы можем ожидать, что наиболее значимая часть будет отменена при расчете D, и ошибки усечения могут стать важными. Никаких признаков этого не было замечено в проведенных тестах

до сих пор, но поскольку только небольшой уголок всего 47-размерное пространство параметров было исследовано, возможность не может быть исключена. Поэтому пользователям программы рекомендуется обрабатывать неожиданные результаты с разумным подходом.
если есть подозрения, и попытаться подтвердить их независимыми методами, если это возможно.

Я был бы признателен, если бы вы указали на существенные ошибки в этом описании и в результатах, полученных с помощью программы WHAMP,
мне сообщили.

IX. Подтверждение

Я благодарен Матсу Андре за его ценную помощь в написании, отладке и тестировании этой программы.

X. Ссылки

Амодт, Р.Э., Физика плазмы, 573, 1967.

Абрамовиц, М. и И. Стигун, Справочник по математике
Функции (Довер, Нью-Йорк, 1965).

Akhiezer, A.I., I.A. Akhiezer, R.V. Polovin, A.G. Sitenko,
и К. Н. Стефанов, Плазменная электродинамика (Pergamon Press, Оксфорд, 1975).

Бейкер, GA, Основы аппроксимаций Паде, (Академический,
Нью-Йорк, 1975).

Клеммоу, П.К. и Дж.П. Догерти, Электродинамика частиц и плазмы (Эддисон-Уэсли,
Лондон, 1969).

Фредрикс, РВ, Журнал физики плазмы, 2, 197, 1968.

Фрид, Б.Д. и С.Д. Конте, Забава о дисперсии плазмы
т ион, (Академик, Нью-Йорк, 1961).

Ичирнару, С., Основные принципы физики плазмы, (WA
Benjamin Inc., Рединг, Массачусетс, 1973).

Карпман, В.И., Ю. К. Алехин, Н.Д. Борисов и Н.А.
Раджабова, Астрофизика. Космические науки, , 267, 1973.

Мартин, П., Г. Доносо и Дж. Самудио-Кристи, Дж. Математика.
Физика, , 280, 1980.

Мартин, П. и М.А. Гонсалес, Phys. Fluids, 22, 1413,
1979.

Немет, Г., А. Аг и Д. Парис, Журнал матем. физики, 22,
1192, 1981.