

УДК 533.9.01

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ БЫСТРО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ СПЕКТРОВ НЕТЕПЛООВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

*М. Е. Викторов<sup>1\*</sup>, С. Д. Ильичёв<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

<sup>2</sup> Высшая школа экономики, г. Москва, Россия

Разработан алгоритм обработки динамических спектров излучения плазмы, который позволяет выделять чирпированные элементы как с растущей, так и с уменьшающейся частотой. Алгоритм протестирован на массиве экспериментальных данных, полученном при исследовании спектров излучения разреженной плазмы электронного циклотронного резонансного разряда в прямой магнитной ловушке. Эффективность метода близка к 100 % для сигналов с отношением сигнал/шум более 30 дБ и составляет около 50 % при отношении сигнал/шум 20 дБ. Данный метод может быть использован для автоматизированного анализа динамических спектров излучения как лабораторной, так и космической плазмы.

### ВВЕДЕНИЕ

В плазме, удерживаемой в магнитных ловушках, при наличии фракции энергичных частиц возможно развитие различных кинетических неустойчивостей, которые, как правило, сопровождаются генерацией электромагнитного излучения. В этой связи изучение динамики спектров электромагнитного излучения плазмы является важной задачей при исследовании лабораторной и космической плазмы. В зависимости от физических условий (тип неустойчивости, величина магнитного поля, концентрация фоновой плазмы и др.) частота излучения может находиться в широком диапазоне от сотен герц до сотен гигагерц. При этом часто в спектрах излучения плазмы обнаруживаются отдельные повторяющиеся всплески с относительно быстрым изменением частоты (чирпированные всплески излучения).

Одним из наиболее известных подобных процессов в околоземной плазме является генерация хоровых излучений (300 Гц ÷ 10 кГц) во внутренней магнитосфере Земли. Излучение данного типа возникает в результате циклотронного взаимодействия энергичных электронов с низкочастотными волнами в области магнитного экватора. Модель генерации хоровых излучений в магнитосфере Земли, позволяющая объяснить многие наблюдаемые их особенности, основана на работе магнитосферного циклотронного лазера в режиме лампы обратной волны (ЛОВ) [1, 2]. Излучение представляет собой квазипериодическую последовательность всплесков с увеличивающейся или уменьшающейся частотой [3]. При этом дрейф частоты в отдельных хоровых элементах связан с развитием сателлитной неустойчивости, обусловленной формированием плато на функции распределения в области захвата резонансных частиц полем волны [4, с. 71]. В результате развития сателлитной неустойчивости генерируются волны на частотах, которые отличаются от начальной частоты на баунс-частоту колебаний скорости захваченных частиц в поле волны. Применение модели ЛОВ позволяет установить связь параметров динамических спектров наблюдаемых дискретных элементов хоров с условиями их генерации [5, 6].

Другим примером генерации чирпированных всплесков является излучение высокотемпературной плазмы, удерживаемой в тороидальных магнитных ловушках, которое возникает вследствие развития альфвеновской турбулентности, вызванной потоками энергичных ионов или

\* [mikhail.viktorov@appl.sci-nnov.ru](mailto:mikhail.viktorov@appl.sci-nnov.ru)

альфа-частиц [7, 8]. Чирпированные всплески излучения на частотах  $30 \div 300$  кГц обнаруживаются при использовании нейтральных инжекторов для нагрева плазмы на установках DIII-D, JT-60U, ASDEX-Upgrade, MAST, NSTX и LHD. Для описания и исследования таких чирпированных структур была предложена модель [9], где одновременное наблюдение нескольких волновых пакетов с дрейфом частоты в одном диапазоне объясняется образованием самосогласованных нелинейных структур в фазовом пространстве вблизи резонансов волна–частица. Во время развития неустойчивости большинство резонансных частиц взаимодействуют с волной адиабатически, и только небольшая доля частиц вызывает локальное сглаживание функции распределения в пространстве скоростей вблизи сепаратрисы, сформированной волной. Однако если фоновая плазма приводит к наличию линейного затухания, то сформированное на функции распределения плато становится неустойчивым и вызывает образование долгоживущих структур в функции распределения — так называемых дыр в фазовом пространстве. Эти структуры представляют собой нелинейные волны типа Бернштейна–Грина–Крускала, частота которых медленно увеличивается или уменьшается с момента начала развития неустойчивости. Движение этих волн в фазовом пространстве синхронизировано с изменением частоты волны, что приводит к образованию наблюдаемых сложных структур в спектре в виде чирпированных всплесков [9].

В наших исследованиях по изучению кинетических неустойчивостей неравновесной плазмы, создаваемой в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) и удерживаемой в компактной прямой магнитной ловушке, также наблюдается нетепловое излучение плазмы с быстрым дрейфом частоты. В работе [10] были получены первые экспериментальные данные о динамике спектра стимулированного излучения неравновесной плазмы в диапазоне частот  $1 \div 10$  ГГц. Особенностью данных спектров является быстрый дрейф частоты внутри волновых пакетов, повторяющихся почти периодически. Тонкая структура спектра излучения данного типа не находит объяснения в рамках квазилинейного подхода, стандартного для описания генерации широкополосного излучения в плазме. С другой стороны, спектры могут быть объяснены в рамках модели [9], обобщённой с учётом специфики циклотронного взаимодействия релятивистских электронов с волнами конечной амплитуды в неоднородном магнитном поле [11].

Для изучения механизмов развития неустойчивости как в космической, так и в лабораторной плазме необходим анализ динамики сложных быстро изменяющихся спектров собственного излучения плазмы, который предполагает выделение сигналов с определёнными законами изменения частоты. Отметим, что в ранее упомянутой работе [5] выделение отдельных хороших элементов в спектре проводилось вручную по методике, описанной в работе [12]. Однако в недавних работах [13, 14] для этих целей был разработан автоматизированный алгоритм на основе методов математической морфологии, автоматически выделяющий чирпированные элементы по заданному шаблону.

Данная работа посвящена развитию другого автоматизированного метода выделения отдельных спектральных элементов из динамических спектров излучения плазмы и представлению новых результатов, полученных с его помощью. Отметим, что предлагаемый метод может быть использован для анализа большого массива экспериментальных данных о спектре электромагнитного излучения плазмы в разных условиях и не является специфичным для конкретного лабораторного эксперимента.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования проводились на стенде SMIS-37 в ИПФ РАН. Неравновесная плазма создавалась излучением гиротрона (частота излучения 37,5 ГГц, длительность импульсов 1 мс, мощность до 80 кВт) в прямой аксиально-симметричной магнитной ловушке

в условиях ЭЦР. Магнитное поле ловушки создавалось при помощи двух импульсных соленоидов. Максимальное магнитное поле достигало величины 4,3 Тл в пробке, пробочное отношение равно 5. Продолжительность импульса магнитного поля составляла около 7 мс. Фоновое давление внутри разрядной камеры поддерживалось на уровне  $10^{-6}$  Торр. Во время разряда давление возрастало вплоть до  $10^{-4} \div 10^{-3}$  Торр. Стенд работал в импульсно-периодическом режиме, частота следования импульсов 1 раз в 30 с. Более подробно схема эксперимента описана в работе [15].

Для ЭЦР разряда характерно наличие плотной холодной компоненты (концентрация  $N_c \approx 10^{13}$  см $^{-3}$ , температура  $T_c \approx 300$  эВ) с изотропным распределением по скоростям и менее плотной компоненты горячих электронов (концентрация  $N_h \approx 10^{10} \div 10^{11}$  см $^{-3}$ , энергия  $T_h$  до 100 кэВ) с анизотропной функцией распределения. Холодная фоновая плазма определяет дисперсионные свойства волн в рассматриваемой среде, а горячая электронная компонента с неравновесным распределением по скоростям обуславливает развитие неустойчивости и генерацию электромагнитного излучения.

Электромагнитное излучение плазмы регистрировалось как в продольном, так и в поперечном направлениях относительно магнитного поля ловушки с помощью приёмных антенн, размещённых вне вакуумного объёма. Сигнал с них подавался на широкополосный осциллограф Keysight DSA-Z594A (полоса пропускания аналогового канала 59 ГГц, частота дискретизации 160 ГВыб/с). В эксперименте фиксировалось собственное излучение плазмы ЭЦР разряда на частотах от 1 до 47 ГГц. Длительность одной осциллограммы составляла 5 мс (800 млн точек на каждый канал осциллографа).

## 2. МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ

В экспериментах наблюдались три стадии ЭЦР разряда: ЭЦР пробой (длительность  $100 \div 200$  мкс), стадия развитого разряда (около 1 мс, до конца импульса греющего излучения) и стадия распада плазмы ( $1 \div 4$  мс после выключения ЭЦР нагрева). На всех стадиях ЭЦР разряда было обнаружено электромагнитное излучение в электронно-циклотронном диапазоне частот, генерируемое в плазме [10, 15, 16]. Данная работа посвящена исследованиям собственного электромагнитного излучения распадающейся плазмы. В таких условиях происходит генерация волн с быстроменяющимся спектром как с увеличением, так и с уменьшением частоты [10].

Пример развития такого рода неустойчивости приведён на рис. 1а. Излучение регистрируется с задержкой от 0,1 до 1 мс после выключения ЭЦР нагрева. Частота излучения всегда меньше электронной гирочастоты в центре ловушки, что соответствует генерации медленной необыкновенной волны. При этом излучение наблюдается только для определённых частотных областей, которые с хорошей точностью определяются модами металлической вакуумной камеры [17]. Поэтому оказывается, что положение данных частотных областей не зависит от параметров ЭЦР разряда, таких как давление газа, мощность ЭЦР нагрева и даже величины магнитного поля в ловушке. Указанные параметры влияют только на тонкую структуру спектра внутри отдельных частотных областей. Однако когда внешнее магнитное поле уменьшается настолько, что электронная гирочастота в центре ловушки выходит за границу соответствующей частотной области, то излучение плазмы в этой области больше не регистрируется, но может наблюдаться в более низкочастотных областях. Внутри каждой частотной области спектр представляет собой последовательность квазимонохроматических всплесков с быстрым дрейфом частоты длительностью до 10 мкс, в то время как общая длительность серии может достигать 1 мс.

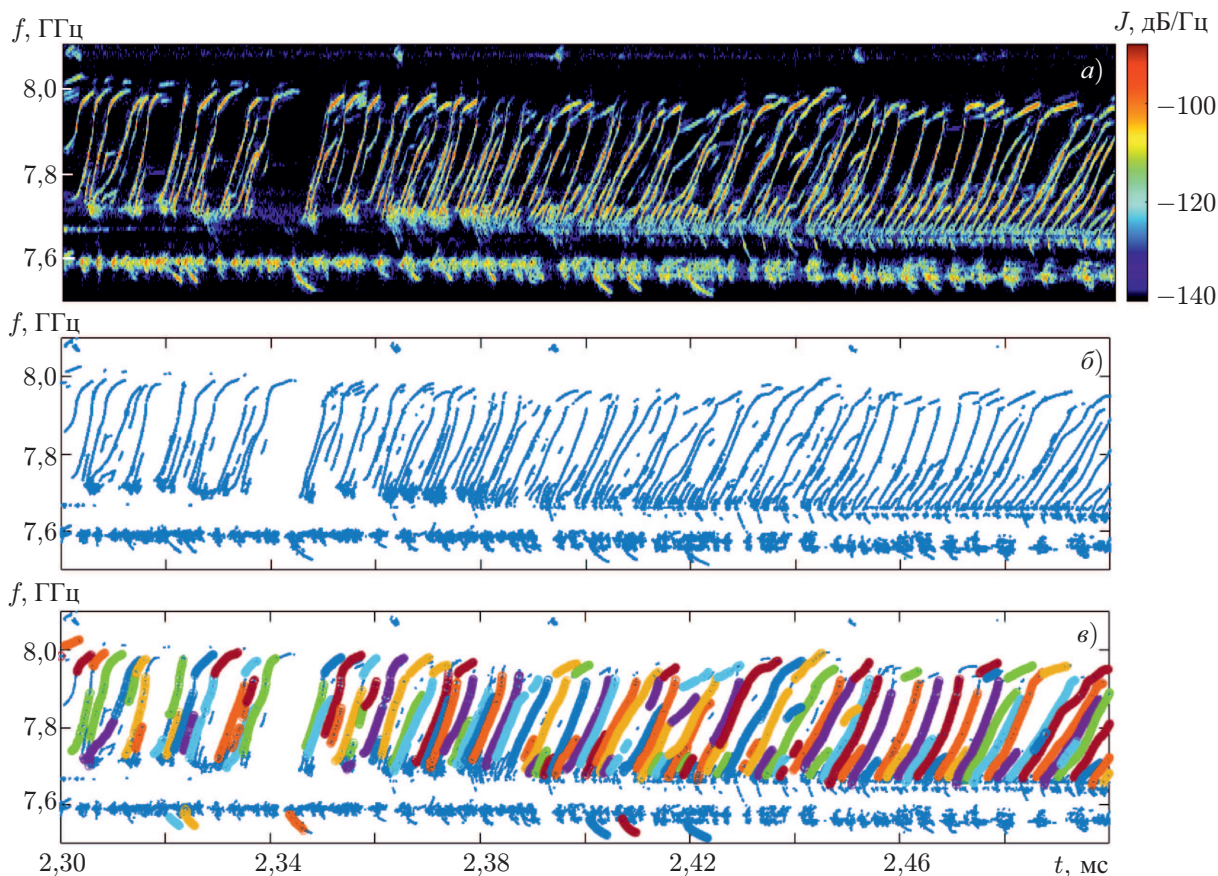


Рис. 1. Динамический спектр излучения неравновесной распадающейся плазмы, который содержит набор чирпированных элементов (а), результаты фильтрации данных (б) и работы алгоритма выделения отдельных чирпированных элементов, показанных разными цветами (в). Параметры алгоритма:  $N = 30$ ,  $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-4}$ ,  $R_0 = 0,95$

### 3. МЕТОД АНАЛИЗА СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Для анализа данных, собранных широкополосным цифровым осциллографом, был разработан алгоритм, выделяющий чирпированные структуры в динамических спектрах как с растущей, так и с уменьшающейся во времени частотой.

Работа алгоритма включает в себя следующие основные элементы. Сначала вычисляется динамический спектр исследуемого сигнала с помощью оконного преобразования Фурье с окном Хэмминга. Далее происходит фильтрация шумов и выделение спектральных компонент с плотностью мощности, которая выше на 30 дБ минимального значения спектральной мощности на спектрограмме. Результат фильтрации данных представляет собой набор точек в пространстве время–частота. Пример обработки динамического спектра, изображённого на рис. 1а, приведён на рис. 1б.

После фильтрации данные нормируются так, чтобы характерная длительность выделяемых элементов и их размер в частотной области были одинаковыми. Другими словами, в новых безразмерных переменных наклон чирпированных элементов получается близким к  $45^\circ$ . Таким образом обеспечивается эквивалентность направлений «время» и «частота» при поиске новых элементов выделяемого множества точек.

Далее проводится анализ с выделением чирпированных элементов по алгоритму, который

является модификацией алгоритма «поиска в глубину» [18, с. 603]. Для этого множество всех точек в пространстве время–частота описывается с помощью графа, где рёбрами соединены точки, которые находятся на расстоянии, меньшем некоторого  $\varepsilon$ . При таком описании множество всех точек разобьётся на  $N$  несвязанных графов, каждый из которых будет описывать отдельный чирпированный элемент. Ниже приводится детальное описание алгоритма.

1) Случайным образом выберем в пространстве точек время–частота опорную точку. Предположим, что она принадлежит выделяемому спектральному элементу.

2) Если внутри окружности с радиусом  $\varepsilon$  на плоскости время–частота находятся другие точки, кроме опорной, то выберем любую из этих точек в качестве новой опорной точки. Будем считать, что новая и старая опорные точки принадлежат одному спектральному элементу.

3) Повторяя действия пункта 2)  $N$  раз, получим кривую, точки которой находятся друг от друга на попарном расстоянии, не превышающем  $\varepsilon$ .

4) Если окажется, что мы не можем повторить действия 2)  $N$  раз, то считаем, что мы попали в уединённую область точек, которая не является чирпированным спектральным элементом, и переходим к пункту 1).

5) Если мы смогли повторить действия пункта 2)  $N$  раз, то для последних  $N$  точек на полученной кривой вычислим коэффициент линейной корреляции. Если он превышает пороговое значение  $R_0$ , то продолжим поиск точек. В противном случае последние  $N$  точек выбрасываются из дальнейшего рассмотрения, поскольку они находятся в области шумов.

6) Действия 2)–5) повторяются до тех пор, пока внутри окружности радиуса  $\varepsilon$  на плоскости время–частота есть непомятые точки. Если таких точек нет, значит, рассматриваемый спектральный элемент выделен полностью. Сохраняем его и переходим к поиску нового элемента 1). Продолжаем анализ до тех пор, пока не будут помечены все точки в отфильтрованном массиве данных на плоскости время–частота.

Результатом работы алгоритма является набор упорядоченных множеств точек, которые составляют отдельные спектральные элементы на плоскости время–частота. Отличительной особенностью данного метода является способность выделять близко расположенные чирпированные элементы, которые могут пересекаться по времени. Именно для обеспечения данной возможности контролируется свойство линейной коррелированности выделенного фрагмента данных. Подбор параметров алгоритма  $\varepsilon$ ,  $N$  и  $R_0$  проводится на предварительном этапе обработки один раз и контролируется визуально. Примеры работы алгоритма на массиве данных с рис. 1б приведён на рис. 1в.

#### 4. АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Методика была протестирована на динамическом спектре излучения плазмы ЭЦР разряда в прямой магнитной ловушке, пример которого приведён в работе [10] на рис. 1. На рис. 3 показан результат работы алгоритма для частотной области  $6,0 \div 6,5$  ГГц. Видно, что он успешно выделяет элементы как с возрастающей частотой, так и с уменьшающейся. При этом широкополосное излучение без дрейфа частоты остаётся невыделенным.

Отметим, что выбранный уровень порога для предварительной фильтрации динамических

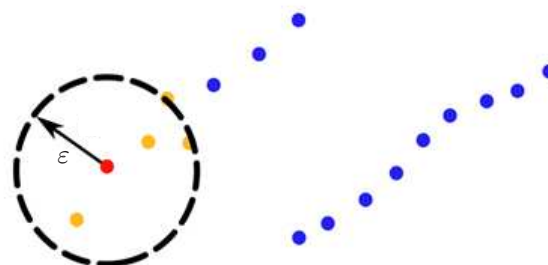


Рис. 2. Иллюстрация работы алгоритма. Синим цветом обозначены точки, которые пока не относятся ни к одному из выделяемых элементов, красным — опорная точка, жёлтым — точки, связанные рёбрами с опорной точкой

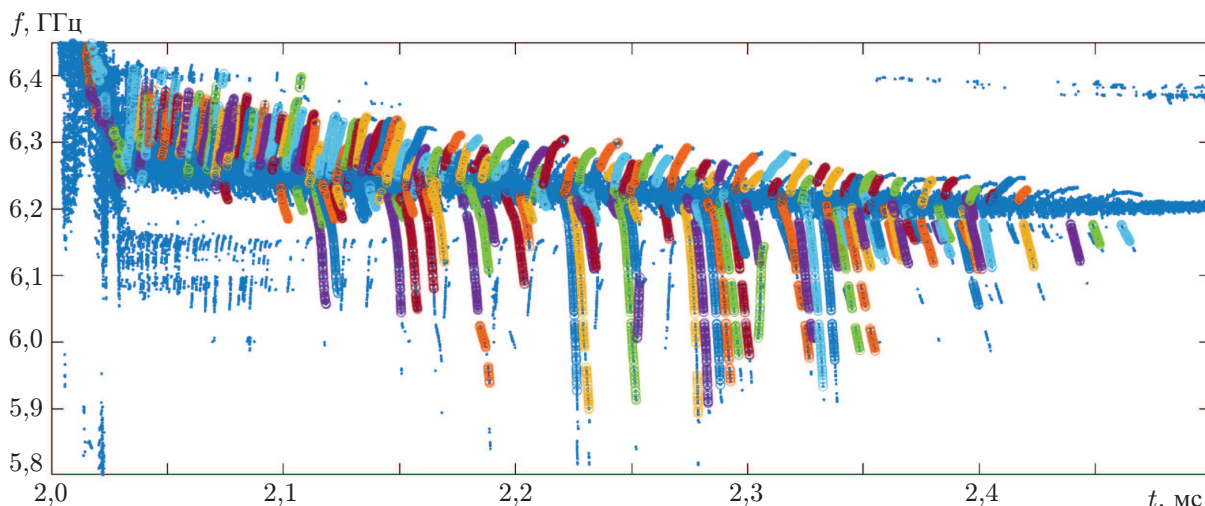


Рис. 3. Анализ динамического спектра с chirпированными элементами, пример которого приведён в работе [10] на рис. 1

спектров в 30 дБ обеспечивает выделение chirпированных элементов с эффективностью, близкой к 100 %. При уменьшении порога предварительной фильтрации шума на 10 дБ успешно выделяется около половины всех элементов. А при уменьшении порога фильтрации на 20 дБ относительно начального значения выделение chirпированных элементов становится невозможным из-за наличия шума в данных.

Из данных на рис. 3 можно определить, как изменяются наклоны chirпированных элементов со временем. Для этого удобно рассмотреть как варьируется угол наклона касательной к каждому выделенному элементу в начальный момент времени. На рис. 4 приведена зависимость начальной скорости изменения частоты chirпированных элементов от времени (показаны только элементы с увеличивающейся частотой).

Скорость изменения частоты внутри каждого волнового пакета  $df/dt$  пропорциональна квадрату баунс-частоты  $\omega_b$  колебаний резонансной частицы, захваченной полем волны, которая в свою очередь связана с амплитудой электрического поля волны, т.е.  $df/dt \propto \omega_b^2 \propto |E_{\sim}|$ . Точные численные коэффициенты в оценке для скорости дрейфа частоты для модели генерации хоровых излучений в режиме ЛОВ обсуждаются в работе [19], а для chirпированных всплесков излучения в тороидальных магнитных ловушках — в работе [9]. Таким образом, используя данную зависимость и результаты измерения скорости изменения частоты излучения (рис. 4), даже на предварительном этапе обработки экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что баунс-частота частиц, захваченных волной, уменьшается со временем.

Кроме того, из модели [9] следует, что дрейф частоты  $df/dt$  внутри каждого волнового пакета пропорционален инкременту неустойчивости. Следовательно, полученные данные можно использовать для оценки линейного инкремента неустойчивости и исследования его изменения во времени [10]. Отметим, что в модели генерации хоровых излучений в режиме ЛОВ скорость дрейфа частоты тоже оказывается связана с величиной линейного инкремента и пропорциональна его квадрату [19].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм обработки динамических спектров излучения плазмы, который позволяет выделять chirпированные элементы как с растущей, так и с уменьшающейся частотой. Отли-

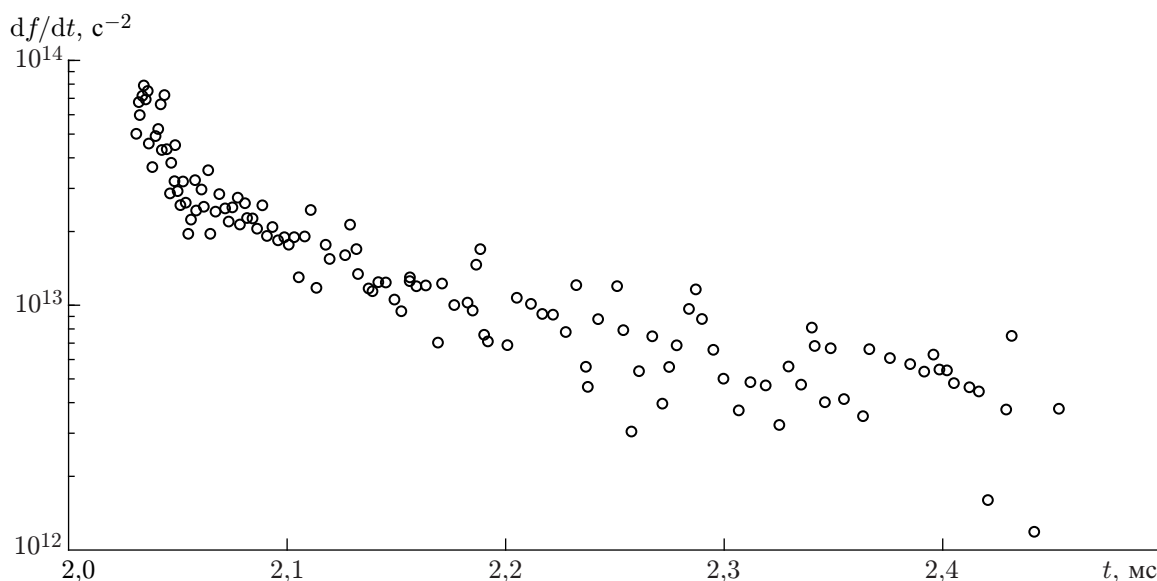


Рис. 4. Зависимость начальной скорости изменения частоты чирпированных элементов от времени для данных на рис. 3. Показаны только элементы с увеличивающейся во времени частотой

чительной особенностью данного метода является способность выделять независимые квазимонохроматические компоненты в динамическом спектре излучения плазмы, которые генерируются одновременно и расположены в частотной области близко друг к другу (отстройка по частоте меньше, чем изменение частоты внутри одного спектрального элемента). Алгоритм протестирован на наборе экспериментальных данных. В частности, в спектре излучения разреженной плазмы ЭЦР разряда были распознаны чирпированные элементы и для одной частотной области было проанализировано, как изменяется их наклон на динамическом спектре во времени. Данный метод может быть использован для автоматизированного анализа динамических спектров излучения как лабораторной, так и космической плазмы.

Разработанный алгоритм успешно выделяет спектральные элементы на спектрограммах с динамическим диапазоном более 30 дБ. В дальнейшем планируется усовершенствовать метод для уменьшения допустимого отношения сигнал/шум.

Авторы выражают благодарность И. С. Абрамову и Н. Ю. Сёмину за помощь в предварительной обработке экспериментальных данных и тестировании разрабатываемого метода. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 17-72-10288).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trakhtengerts V. Y. // J. Geophys. Res.: Space Physics. 1995. V. 100, No. A9. P. 17 205.
2. Trakhtengerts V. Y. // Ann. Geophys. 1999. V. 17, No. 1. P. 95.
3. Li W., Thorne R. M., Bortnik J., Shprits Y. Y., et al. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38, No. 14. Art. no. L14103.
4. Trakhtengerts V. Yu., Rycroft M. J. Whistler and Alfvén mode cyclotron masers in space. New York: Cambridge University Press, 2008. 354 p.
5. Macušová E., Santolík O., Décreau P., et al. // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2010. V. 115, No. A12. P. A12257.

6. Titova E., Demekhov A., Kozelov B., et al. // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2012. V. 117, No. A8. Art. no. A08210.
7. Breizman B.N., Sharapov S.E. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2011. V. 53, No. 5. Art. no. 054001.
8. Sharapov S.E., Alper B., Berk H.L., et al. // *Nucl. Fusion*. 2013. V. 53, No. 10. Art. no. 104022.
9. Berk H.L., Breizman B.N., Petviashvili N.V. // *Phys. Lett. A*. 1997. V. 234, No. 3. P. 213.
10. Viktorov M.E., Shalashov A.G., Mansfeld D.A., Golubev S.V. // *Europhysics Lett*. 2016. V. 116, No. 10. P. 55001.
11. Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Viktorov M.E. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2019. V. 61, No. 8. Art. no. 085020.
12. Santolík O., Macúšová E., Titova E., et al. // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26, No. 6. P. 1665.
13. Ларченко А.В., Демехов А.Г., Козелов Б.В. // *Тр. Кольского научного центра РАН. Сер. Гелиогеофизика*. 2017. Вып. 3. С. 47.
14. Ларченко А.В., Демехов А.Г., Козелов Б.В. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2019. Т. 61, № 3. С. 177.
15. Shalashov A.G., Viktorov M.E., Mansfeld D.A., Golubev S.V. // *Phys. Plasmas*. 2017. V. 24, No. 3. Art. no. 032111.
16. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Демехов А.Г. и др. // *Физика плазмы*. 2005. Т. 31. С. 997.
17. Viktorov M.E., Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., et al. // *Proc. of 45th European Physical Society Conf. Plasma Physics. Prague 2–6 July 2018*. V. 42A. P. 101.
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to Algorithms*. London: MIT Press and McGraw-Hill, 2009. 1292 p.
19. Демехов А.Г. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2016. Т. 59, № 10. С. 863.

Поступила в редакцию 30 марта 2018 г.; принята в печать 30 апреля 2019 г.

## METHOD FOR STUDYING THE DYNAMICS OF FAST FREQUENCY SWEEPING EVENTS IN THE SPECTRA OF NON-THERMAL ELECTROMAGNETIC PLASMA EMISSION

*M. E. Viktorov and S. D. Il'ichev*

We developed an algorithm for processing of the dynamic spectra of plasma emission, which makes it possible to extract chirped elements with both increasing and decreasing frequencies. The algorithm was tested on an array of experimental data obtained by studying the emission spectra of the rarefied plasma of an electron cyclotron resonant discharge in an open magnetic trap. The efficiency of the method is close to 100% for signals with a signal-to-noise ratio of more than 30 dB and about 50% with a signal-to-noise ratio of 20 dB. This method can be used for automated analysis of dynamic emission spectra of both laboratory and space plasmas.