

УДК 523.45

А. В. Архипов

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины
61002, Харьков, ул. Краснознаменная 4

О модуляционных дорожках в спектре декаметрового радиоизлучения Юпитера: частотные дрейфы

В исследованиях Имаи и др. (1992—2002) модуляционные дорожки Юпитера интерпретируются как рассеяние излучения на неоднородностях плазменного тора Ио, вытянутых вдоль магнитного поля. Однако дорожки с обратным (относительно вращения тора Ио) дрейфом по частоте оставались загадкой. В работе показано, что вытянутые вдоль поля неоднородности магнитосферной плазмы, расположенные на низких высотах над ионосферой Юпитера, формируют как раз обратный знак дрейфа модуляционных дорожек. Новый, более корректный алгоритм использован для комплексной интерпретации частотных дрейфов дорожек на эмпирической диаграмме Й. Й. Рихимаа (1979). Обнаружено, что все кластеры точек на этой диаграмме вполне объяснимы в рамках рассмотренной модели, а угол раствора конуса декаметрового радиоизлучения составляет около 70°.

ПРО МОДУЛЯЦІЙНІ ДОРІЖКИ У СПЕКТРІ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЮПІТЕРА: ЧАСТОТНІ ДРЕЙФИ, Архипов О. В. — В дослідженнях Імаї та ін. (1992—2002) модуляційні доріжки Юпітера тлумачаться як розсіювання на неоднорідностях плазмового тору Іо, витягнутих уздовж магнітного поля. Але доріжки зі зворотним (відносно обертання тору Іо) дрейфом по частоті залишалися загадкою. В роботі показано, що витягнуті уздовж магнітного поля неоднорідності магнітосферної плазми, розташовані на малих висотах над іоносферою Юпітера, формують саме зворотний знак дрейфу модуляційних доріжок. Новий, більш коректний алгоритм використано для комплексної інтерпретації частотних дрейфів доріжок на емпіричній діаграмі Й. Й. Ріхімаа (1979). З'ясовано, що усі кластери точок на цій діаграмі вдається пояснити у рамках застосованої моделі, а кут розкриття конуса декаметрового радіовипромінювання складає приблизно 70°.

ON MODULATION LANES IN SPECTRA OF THE JOVIAN DECA-METRIC RADIO EMISSION: FREQUENCY DRIFTS, by Arkhipov A. V. — K. Imai et al. (1992—2002) interpret the Jovian modulation lanes in terms of radiation scattering produced by field-aligned inhomogeneities in the Io plasma torus. However, the lanes with opposite (with respect to the Io torus rotation) drifts in frequency remained an enigma. We show that field-aligned inhomogeneities of the magnetospheric plasma at low altitudes above the Jovian ionosphere generate just the opposite drifts of modulation lanes. A new, more

correct, algorithm is used for the comprehensive interpretation of J. J. Riihima's (1979) empirical diagram of frequency-time drift rates of the lanes. It is found that all the point clusters of the diagram are explicable in the framework of the proposed model, and the cone half-angle of the decametric radiation is about 70° .

ВВЕДЕНИЕ

Модуляционными дорожками (modulation lanes) принято называть дрейфующие по частоте детали динамического спектра декаметрового радиоизлучения Юпитера, которые имеют вид квазипериодической последовательности наклоненных ярких и темных полос, заметных только на фоне радиобурь планеты. На фиксированной частоте характерный период модуляции составляет 2—10 с, а глубина — несколько децибел [4]. Скорость дрейфа дорожек может быть как положительной, так и отрицательной, и по модулю заключена в пределах от 10 кГц/с до 300 кГц/с, обычно увеличиваясь с частотой [17]. Типичный вид таких деталей спектра показан на рис. 1 согласно [5].

С 1963 г. накоплен богатый экспериментальный материал по феноменологии модуляционных дорожек (главным образом усилиями первооткрывателя Й. Й. Риихимаа) [4, 14—17]. Корреляция скорости дрейфа дорожек по частоте с долготой центрального меридиана Юпитера и с орбитальной долготой спутника Ио свидетельствует о формировании этих деталей спектра в магнитосфере Юпитера. Дорожки наблюдаются только на фоне радиобурь независимо от их типа (L или S), но могут и вовсе отсутствовать

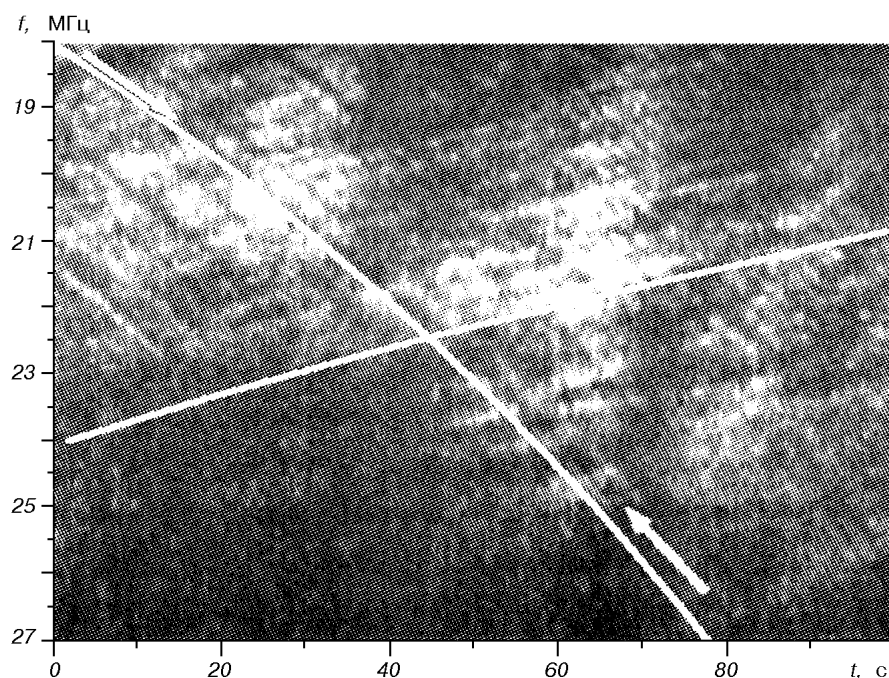


Рис. 1. Модуляционные дорожки, наблюдавшиеся 23.08.1997 в 2 ч 32 м 40 с UT с помощью широкополосного радиоспектрографа Флоридского университета [5]. Характерный пример модуляционной дорожки указан стрелками. Белые линии — результаты применения алгоритма DRIFT для моделирования проходов перед радиоисточником волокнистых неоднородностей магнитосферы, вытянутых вдоль магнитных силовых линий. Неоднородность на L-оболочке Ио соответствует расчетной кривой с положительным дрейфом по частоте. Кривая с отрицательным дрейфом вычислена при расстоянии источник-неоднородность $0.5R_J$

во время бури (т. н. события L1 Й. Й. Риихимаа [14, 17]). Все это привело к выводу о том, что дорожки действительно являются амплитудной модуляцией излучения, возникающей в процессе распространения электромагнитных волн в окрестностях Юпитера.

Высказывались различные суждения о природе этой модуляции. Очевидно, фарадеевское вращение к модуляционным дорожкам отношения не имеет, поскольку последние регистрируются и антеннами с круговой поляризацией [4, 17]. С другой стороны, поляриметрические измерения не подтвердили и гипотезу об эффекте Коттона-Мутона [4, 15]. Гипотеза Й. Й. Риихимаа [16] о формировании модуляционных дорожек в результате рассеяния излучения неоднородностями внешней границы магнитосферы Юпитера основана на сомнительной корреляции дрейфов дорожек с элонгацией планеты и была подвергнута критике [4]. Наконец, дорожки интерпретировались как интерференционные полосы в окрестностях каустики, возникающей в результате фокусировки излучения тором плазмы, окружающим орбиту спутника Ио (далее — тор Ио) [10]. Авторы идеи анонсировали детальное моделирование модуляционных дорожек [4], но судя по отсутствию публикаций на эту тему за прошедшие два десятилетия, результаты были неудовлетворительными.

Более плодотворной оказалась гипотеза К. Имаи, Л. Уанга и Т. Д. Карра [7] о дифракции излучения на неоднородностях тора Ио, коротирующего с магнитным полем Юпитера. Предполагалось, что такие неоднородности вытянуты вдоль магнитных силовых линий в торе и расположены в виде эквидистантной, почти плоской дифракционной решетки. Но даже такая явно идеализированная геометрия позволила впервые воспроизвести зависимость скорости дрейфа большинства дорожек как от частоты, так и от долготы центрального меридиана Юпитера [5—8]. К сожалению, и эта модель не лишена недостатков.

1. Одностороннее движение тора Ио на фоне радиоисточника создает дорожки дрейфующие либо в сторону высоких частот, либо в сторону низких (в зависимости от конкретной геометрии). Модель принципиально не может объяснить часто наблюдающиеся случаи сосуществования дрейфов обоих знаков одновременно (тип L3 Й. Й. Риихимаа [17], представленный на рис. 1). Соответствующие кластеры точек диаграммы Й. Й. Риихимаа [17] просто исчезли при ее воспроизведении в работах [6, 8].

2. Постулат о расположении неоднородностей тора Ио на одной дистанции от центра Юпитера противоречит явным различиям скорости дрейфа у соседних дорожек. Такой разброс скорости частотного дрейфа был отмечен еще в 1970 г. [14].

3. В расчетах не учтены кривизна и наклон к экватору магнитных силовых линий в торе Ио. Кроме того, использована устаревшая модель магнитного поля Юпитера (O_4 GSFC). Возникающая при этом погрешность вычисления дрейфа дорожек нуждается в оценке, а полученные результаты — в ревизии.

Ниже предпринята попытка решения указанных проблем путем более корректного вычисления дрейфа модуляционных дорожек.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Есть несколько доводов в пользу наличия в магнитосфере Юпитера неоднородностей плазмы, вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля:

а) область повышенной плотности плазмы расширяется преимущественно вдоль магнитных силовых линий из-за замедления диффузии поперек магнитного поля;

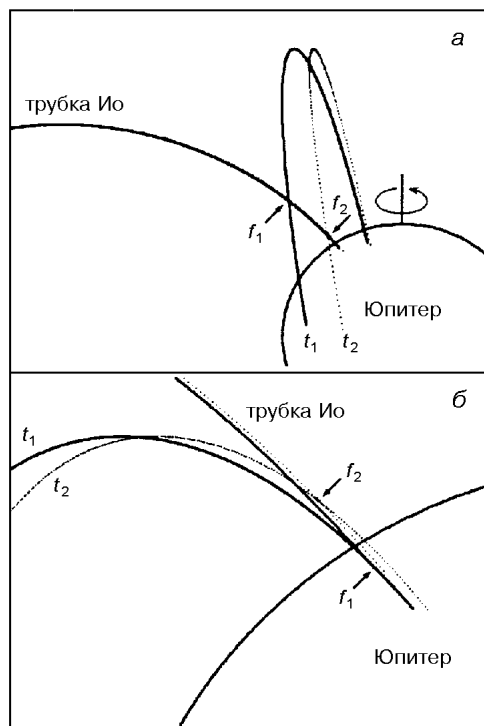


Рис. 2. Схема возникновения модуляционных дорожек, дрейфующих по частоте в противоположных направлениях одновременно в магнитосфере, коврающейся с Юпитером. Если на излучающую магнитную трубку Ио проектируется неоднородность тора Ио (а), имеем $f_2 > f_1$ и $df/dt > 0$. Если же неоднородность расположена в нижней магнитосфере (б), то $f_2 < f_1$ и $df/dt < 0$

б) электрические токи часто формируют волокнистую плазменную структуру, ориентированную по полю [1];

в) давно известно наличие неоднородностей земной магнитосферы, вытянутых параллельно полю; такие образования предполагаются и в окрестностях Юпитера [11];

г) ориентированные вдоль магнитного поля потоки электронов обнаружены в торе Ио *in situ* и интерпретировались как довод в пользу наличия авроральных лучей в основании юпитерианской магнитосферы [12].

Такая область повышенной электронной плотности, проектирующаяся на источник, действует как рассеивающая линза, и поток радиоизлучения будет ослаблен.

Радиоизлучение, с которым связано большинство модуляционных дорожек, наблюдавшихся на частоте около 22 МГц [17], принято связывать с магнитной силовой линией, проходящей через эффективное положение Ио (далее — трубка Ио или ТИ) [5—8]. Разность орбитальных долгот эффективного и истинного положений Ио называется углом опережения ($\Delta\lambda_{\text{Ио}}$). Как принято считать [5—8], декаметровое излучение генерируется в той точке активной силовой линии, где наблюдаемая частота f излучения связана с локальной циклотронной частотой f_c электронов уравнением $f = Kf_c$, где константа K обычно полагается близкой к 1. Если в данный момент времени t_1 излучение генерируется на всей активной силовой линии, то в точке проекции на нее неоднородности поток излучения будет уменьшен. Эта точка генерирует частоту f_1 . В процессе вращения магнитосферы волокно-неоднородность смещается и в момент времени t_2 проектируется на другую точку трубки Ио с частотой f_2 (рис. 2). Соответственно в динамическом спектре радиотень неоднородности выглядит как темная полоска (дорожка), соединяющая точки t_1, f_1 и t_2, f_2 .

Для вычисления скорости дрейфа модуляционных дорожек по частоте автором создана оригинальная компьютерная процедура DRIFT, более точная, чем алгоритм в работах [5—8]. Ее суть заключается в проекции магнитных силовых линий на картинную плоскость и в численном решении задачи нахождения точки пересечения этих проекций.

Для нужного момента времени t и частоты f находится положение источника на трубке Ио (X_{ps}, Y_{ps}, Z_{ps}) в правой декартовой системе координат. Центр системы отсчета помещен в центр Юпитера; ось Z_p направлена на Землю; оси X_p и Y_p лежат в картинной плоскости и направлены параллельно экватору и оси вращения Юпитера соответственно. Тогда можно задать координаты опорной точки магнитосферной неоднородности, проецирующейся на источник: $X_{pn} = X_{ps}$; $Y_{pn} = Y_{ps}$; $Z_{pn} = Z_{ps} + D$, где D — расстояние от источника до неоднородности. С помощью матрицы поворота осуществляется переход в систему координат, ковращающуюся с магнитным полем Юпитера (ось Z направлена вдоль оси вращения Юпитера; оси X, Y лежат в плоскости экватора планеты, причем ось X направлена на нулевой меридиан в системе вращения III):

$$\begin{aligned} X_n &= X_{pn}\sin\lambda - Y_{pn}\cos\lambda\sin D_e + Z_{pn}\cos\lambda\cos D_e, \\ Y_n &= X_{pn}\cos\lambda + Y_{pn}\sin\lambda\sin D_e - Z_{pn}\sin\lambda\cos D_e, \\ Z_n &= Y_{pn}\cos D_e + Z_{pn}\sin D_e, \end{aligned}$$

где λ — долгота центрального меридиана Юпитера; D_e — иовицентрическое склонение Земли. В этой системе координат удобно численно проследить магнитные силовые линии, определяющие излучающую ТИ и волокно-неоднородность плазмы. Переходы от одной системы координат к другой и обратно позволяют вычислять тангенциальные (видимые) координаты точек ТИ и неоднородности плазмы для моментов времени $t_1 = t - \Delta t$ и $t_2 = t + \Delta t$. Для места проекции неоднородности на излучающую ТИ вычисляются частоты радиоизлучения f_1 и f_2 для моментов времени t_1 и t_2 соответственно. Тогда скорость дрейфа равна $df/dt = (f_2 - f_1)/(t_2 - t_1)$. Погрешность оценки обычно не превышает 1 %.

В вычислениях использовалась новейшая модель магнитного поля Юпитера VIP 4 [3]. Значение угла опережения было принято $\Delta\lambda_{ио} = 25^\circ$, в соответствии с результатами анализа диаграммы направленности излучения северных (наиболее наблюдаемых) радиоисточников Юпитера [13, 18]. Оценка же этого угла в 50° , полученная с помощью упрощенного алгоритма вычислений df/dt [5, 6, 8], на данном этапе исследований не учитывалась, как нуждающаяся в уточнении. Результаты такого уточнения планируется представить в отдельной статье.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕТЧАТЫХ УЗОРОВ

Скорость дрейфа дорожки по частоте зависит от D не только через скорость вращения магнитосферы, но и через взаимную ориентацию проекций активной линии и неоднородности на картинную плоскость. Вторым фактором может приводить к смене знака дрейфа, что проиллюстрировано на рис. 3. Именно это обстоятельство способно объяснить давнюю загадку одновременного наблюдения дорожек с df/dt разных знаков. Ведь кроме тора Ио, есть еще одна область повышенной плотности плазмы — нижние слои магнитосферы Юпитера. Эти две области формируют два семейства модуляционных дорожек, дрейфующих в противоположных направлениях:

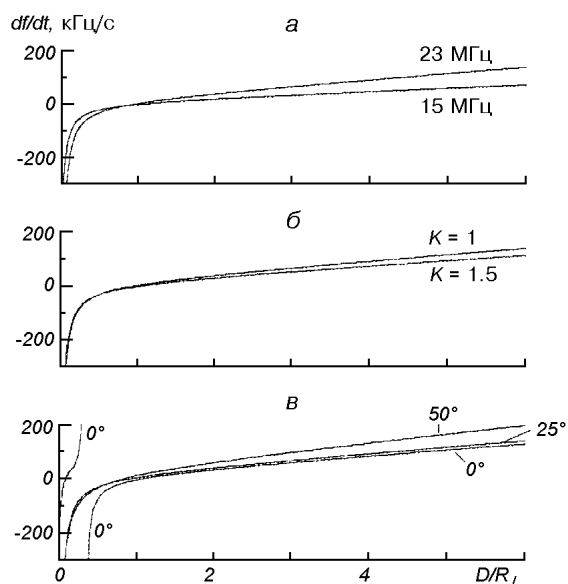


Рис. 3. Зависимость частотного дрейфа модуляционных дорожек от дистанции источник-неоднородность. Стандартный набор параметров для расчета кривых: $\lambda = 120^\circ$, $\Phi_{И0} = 90^\circ$, $f = 23$ МГц и $\Delta\lambda_{И0} = 25^\circ$, $K = 1$. Показана зависимость расчетных кривых от f (а), K (б), $\Delta\lambda_{И0}$ (в)

— ближние дорожки ($D/R_J < 1$, где $R_J = 71372$ км — экваториальный радиус Юпитера);

— дальние дорожки ($D/R_J \sim 6$).

Так на рис. 1 дрейфы наблюдаемых дорожек близки к теоретическим кривым, рассчитанным для данного интервала времени и частот в предположении формирования дорожек на L-оболочке Ио ($D/R_J = 5.12$) и в нижней магнитосфере ($D/R_J = 0.5$).

Чаще всего модуляционные дорожки наблюдались на частотах около 23 МГц, при долготе центрального меридиана $\lambda \approx 120^\circ$ и орбитальной долготе Ио $\Phi_{И0} \approx 90^\circ$ [4, рис. 5, d, e]. Поэтому именно для этих значений параметров и были рассчитаны демонстрационные зависимости df/dt от D (рис. 3, а—в). Скорости дрейфа ближних модуляционных дорожек почти не зависят от параметра K из-за слабой кривизны магнитных силовых линий на малых высотах (рис. 3, б).

С помощью упомянутых кривых удастся понять в общих чертах формы модуляционных дорожек. Наблюдается увеличение ближних $|df/dt|$ с частотой, как показано на рис. 1, 3, а. Модуляция с таким поведением описана в [4] как обычные дорожки. Уменьшение модуля дрейфа с частотой всегда присуще и дальним дрейфам. Обычно ближние дорожки дрейфуют в обратном направлении по сравнению с дальними. При $\lambda < 180^\circ$ дальний дрейф положителен (дорожки типа L2 в [4, 17]), а ближний — отрицателен (тип L4 Й. Й. Риихимаа). При $\lambda > 180^\circ$ все наоборот: дальние дрейфы отрицательны (L4), а ближние — положительны (L2). Но, как демонстрирует рис. 3, в ($\Delta\lambda_{И0} = 0^\circ$), не исключено, что иногда ближние дрейфы могут иметь различный знак даже для одного и того же момента времени. Ввиду такой непростой картины физической классифицировать модуляционные дорожки не по знаку дрейфа (L2, L3, L4), а по месту их формирования (ближние, дальние).

Согласно данным [4] ближние модуляционные дорожки на частоте 22 МГц распределены по скорости дрейфа от 0 до -175 кГц/с в источнике Ио-В ($\lambda \approx 120^\circ$; $\Phi_{И0} \approx 90^\circ$, и от $+10$ до $+30$ кГц/с в области Ио-АС $\lambda \approx 270^\circ$; $\Phi_{И0} \approx 240^\circ$). Это соответствует дистанциям источник-неоднородность $0.13 < D/R_J < 0.96$ и $0.31 < D/R_J < 0.62$ соответственно. Наиболее вероятные

значения дрейфа на частоте 23 МГц составляют $-50 < df/dt < -25$ кГц/с в Ио-В и $15 < df/dt < 25$ кГц/с в Ио-АС [4]. Это соответствует дистанциям $0.38 < D/R_J < 0.57$ и $0.38 < D/R_J < 0.52$. Следовательно, ближние модуляционные дорожки формируются на характерном расстоянии от источника порядка $0.5R_J$, хотя встречаются на различных дистанциях от $0.2R_J$ до $1R_J$.

Скорости дрейфа дальних модуляционных дорожек составляет $75 < df/dt < 300$ кГц/с в Ио-В и $-175 < df/dt < -75$ кГц/с в Ио-АС [4]. Соответствующие дистанции равны $3.6 < D/R_J < 13.8$ и $4.1 < D/R_J < 8.8$. Для наиболее вероятных значений дальних дрейфов ($125 < df/dt < 150$ кГц/с в Ио-В; $-150 < df/dt < -100$ кГц/с в Ио-АС [4]) на частоте 23 МГц получено $5.4 < D/R_J < 6.5$ и $5.0 < D/R_J < 7.2$, что хорошо соответствует радиальным размерам тора Ио ($(5...8)R_J$ [2]).

ДИАГРАММА Й. Й. РИИХИМАА

Зная зоны формирования модуляционных дорожек, можно дать интерпретацию известной диаграмме Й. Й. Риихимаа [16, 17], на которой изображено распределение модуляционных дорожек по плоскости $df/dt - \lambda$ для частоты 22 МГц по результатам наблюдений за полный сидерический год Юпитера (рис. 4). Предшествующие попытки [5—8] ее объяснения ограничивались двумя самыми заметными кластерами точек (A_1, B_1), которые соответствуют дальним дрейфам в источниках Ио-В и Ио-А. Остальные кластеры казались настолько непонятными, что их предпочитали просто устранять с иллюстраций. Теперь им можно дать простую интерпретацию.

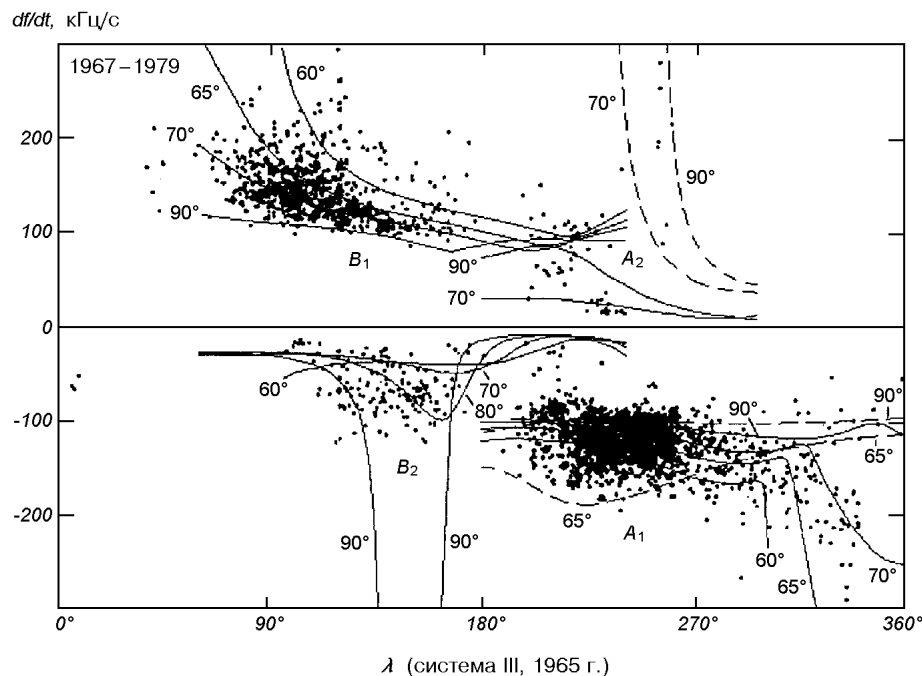


Рис. 4. Оригинал диаграммы Й. Й. Риихимаа [16] с теоретическими кривыми зависимости скорости частотного дрейфа дорожек (вертикальная шкала в кГц/с) от долготы центрального меридиана (горизонтальная шкала в градусах). Цифры у кривых показывают угол раствора диаграммы направленности излучения в источнике. Сплошные кривые соответствуют северным источникам, пунктирные — южным. Все кривые рассчитаны при $f = 22$ МГц

Чтобы моделировать диаграмму Й. Й. Риихимаа, для каждого значения λ необходимо задать положение радиоисточника. Понятно, что источник должен быть ориентирован так, чтобы Земля попадала в диаграмму направленности радиоизлучения Юпитера. Согласно стандартной модели [5—8], диаграмма направленности имеет вид полого конуса, осью которого является вектор магнитного поля в той точке силовой линии Ио, где $f \approx f_c$. Тогда угол ψ между направлением на Землю и вектором магнитного поля в источнике должен быть равен углу ψ_0 раствора диаграммы направленности, либо дополнять его до 180° (при источнике на южной ветви ТИ). Специальный компьютерный алгоритм позволяет изменять эффективное положение Ио и непрерывно вычислять угол ψ до тех пор, пока не будет выполнено условие видимости источника ($\psi = \psi_0$ на севере или $\psi = 180^\circ - \psi_0$ на юге, где значение ψ_0 постулируется). Для найденного положения источника вычисляется df/dt . В результате теоретические df/dt модуляционных дорожек нанесены на диаграмму Й. Й. Риихимаа как функции λ (рис. 4).

Кривые на рис. 4 вычислены для нескольких значений угла раствора диаграммы направленности ($\psi_0 = 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$). Они не зависят от угла опережения. Видно, что оценка оптимального угла в $\psi_0 = 60^\circ$, сделанная К. Имаи и др. [5—8], явно занижена. Главные кластеры экспериментальных точек (A_1, B_1) лучше соответствуют $\psi_0 \approx 70^\circ$. Это значение согласуется с оценками угла путем анализа поляризационных данных (70° [9]) и диаграммы направленности северных радиоисточников Юпитера (80° [18] и $70^\circ \dots 75^\circ$ [13]).

Все ближние дрейфы (на рис. 4 обозначены A_2 и B_2) вычислены для наиболее вероятной оценки $D = 0.5$, сделанной в предыдущем разделе. Иногда они сильно зависят от ψ_0 , но не годятся для надежной оценки этого угла из-за сильной зависимости дрейфов от D и магнитной модели. Это объясняется тем, что ближние df/dt определяются *малыми* взаимными наклонами магнитных силовых линий в нижней магнитосфере. Но даже ввиду влияния всех этих факторов, согласие расчетных кривых с экспериментальными точками выглядит удовлетворительно.

Разброс точек в кластере A_1 заметно превышает различия расчетных кривых. Возможно, это свидетельствует о дисперсии неоднородностей тора Ио по D , поскольку толщина тора составляет около $3R_J$ в радиальном направлении [2]. Однако частично ($\pm 9\%$) этот эффект вызван изменениями иоцентрического склонения Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение более точного алгоритма вычисления частотных дрейфов модуляционных дорожек по методу Имаи-Уанга-Карра [7] позволяет сделать следующие выводы.

1. Угол раствора диаграммы направленности декаметрового радиоизлучения, контролируемого спутником Ио, составляет около 70° на частоте 22 МГц. Прежняя оценка в 60° [5—8] существенно расходится с результатами наблюдений Й. Й. Риихимаа.

2. Необъясненные модуляционные дорожки с обратным дрейфом по частоте формируются на неоднородностях нижней магнитосферы, вытянутых вдоль магнитного поля и расположенных на удалении порядка $0.5R_J$ от источника.

3. Имеет смысл классифицировать модуляционные дорожки не только по знаку частотного дрейфа, как делалось до сих пор, но и по области их формирования. Соответственно можно выделить два семейства дорожек:

- *ближние*, формирующиеся не далее, чем $1R_J$ от источника;
- *дальние*, формирующиеся в плазменном торе Ио (около $6R_J$ от источника).

4. Сосуществование дорожек обоих семейств объясняет давнюю загадку сетчатых узоров (тип L3 по Й. Й. Риихимаа [4, 17]) в динамическом спектре декаметрового радиоизлучения Юпитера.

Таким образом, открывается путь для изучения структуры самых нижних слоев магнитосферы Юпитера, оставшихся практически недостижимыми для средств наземной астрономии.

Автор весьма признателен Й. Й. Риихимаа за предоставленную возможность ознакомиться с результатами его многолетних наблюдений. Особая благодарность К. Имаи за подробную информацию о его модели и обстоятельствах наблюдений.

1. Альвен Х. Космическая плазма. — М.: Мир, 1983.—216 с.
2. Bagenal F. Empirical model of the Io plasma torus: Voyager measurements // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A6.—P. 11043—11062.
3. Connerney J. E. P., Acuna M. H. New models of Jupiter's magnetic field constrained by the Io flux tube footprint // J. Geophys. Res.—1998.—103, N A6.—P. 11929—11939.
4. Genova F., Aubier M. G., Lecacheux A. Modulations in Jovian decametric spectra: propagation effects in terrestrial ionosphere and Jovian environment // Astron. and Astrophys.—1981.—104, N 2.—P. 229—239.
5. Imai K., Reyes F., Carr T. D. Modulation lane measurement of Jupiter's Io-B source parameters // Planetary Radio Emissions V / Eds H. O. Rucker, M. L. Kaiser, Y. Leblanc. — Vienna: Austrian Acad. Sc. Press, 2001.—P. 119—125.
6. Imai K., Riihimaa J. J., Reyes F., Carr T. D. Measurement of Jupiter's decametric radio source parameters by the modulation lane method // J. Geophys. Res.—2002.—107, N A6.—P. 101029—101039.
7. Imai K., Wang L., Carr T. D. Origin of Jupiter's decametric modulation lanes // Planetary Radio Emissions III / Eds H. O. Rucker, S. J. Bauer, B. M. Pedersen. — Vienna: Austrian Acad. Sc. Press, 1992.—P. 69—90.
8. Imai K., Wang L., Carr T. D. Modeling Jupiter's decametric modulation lanes // J. Geophys. Res.—1997.—102, N A4.—P. 7127—7136.
9. Leblanc Y., Dulk G. A., Bagenal F. On Io's excitation and the origin of Jupiter's decametric radiation // Astron. and Astrophys.—1994.—290, N 2.—P. 660—673.
10. Lecacheux A., Meyer-Vernet N., Daigne G. Jupiter's decametric radio emission: a nice problem of optics // Astron. and Astrophys.—1981.—94, N 2.—P. 9—12.
11. Louarn P. Radio emissions from filamentary sources: a simple approach // Planetary Radio Emissions IV / Eds H. O. Rucker, S. J. Bauer, A. Lecacheux. — Vienna: Austrian Acad. Sc. Press, 1997.—P. 153—165.
12. Paterson W. R., Frank L. A. Auroral beams in Jupiter's magnetosphere // Bull. Amer. Astron. Soc.—2002.—34, N 3.—P. 905.
13. Queinnee J., Zarka P. Io-controlled decameter arcs and Io-Jupiter interaction // J. Geophys. Res.—1998.—103, N A11.—P. 26649—26666.
14. Riihimaa J. J. Modulation lanes in the dynamic spectra of Jovian L bursts // Astron. and Astrophys.—1970.—4, N 2.—P. 180—188.
15. Riihimaa J. J. Polarization patterns in the dynamic spectra of Jupiter's decametric radio bursts // Astron. and Astrophys.—1976.—53, N 1.—P. 121—129.
16. Riihimaa J. J. Modulation lanes in the dynamic spectra of Jupiter's decametric radio bursts // Astron. and Astrophys.—1979.—78, N 3.—P. L21—L23.
17. Riihimaa J. J. Modulation lanes revisited. — Oulu: Univ. Oulu, 1993.—92 p.
18. Thieman J. R., Smith A. G. Detailed geometrical modeling of Jupiter's Io-related decametric radiation // J. Geophys. Res.—1979.—84, N A6.—P. 2666—2674.

Поступила в редакцию 17.02.03