

Влияние ширины области ускоренных электронов на микроволновое излучение возмущённого радиальной БМЗ волной плазменного слоя

Куприянова Е.Г.^{1,2}, Кальтман Т.И.³, Накаряков В.М.^{2,3,4},
Колотков Д.Ю.^{2,4}, Кузнецов А.А.^{2,5}

¹ ГАО РАН

² ИСЗФ СО РАН

³ СТПБФ САО РАН

⁴ Университет Ворвик

⁵ ИГУ

Введение

Импульсное энерговыделение в солнечной короне может служить триггером для различного вида магнитогидродинамических (МГД) волн, а плазменные неоднородности в магнитном поле могут являться для них волноводами. Распространяясь в волноводе, МГД волны модулируют его плотность и магнитное поле, что в свою очередь приводит к модуляции излучения, которое наблюдается в различных диапазонах электромагнитного спектра.

Наличие ускоренных электронов в плазменных структурах приводит к тому, что волновод становится также источником излучения в микроволновом диапазоне, которое на частотах выше 3 ГГц обычно ассоциируется с гиросинхротронным механизмом. Ввиду сильной чувствительности интенсивности микроволнового излучения от величины и направления магнитного поля в источнике, слабые вариации параметров волновода могут привести к заметным вариациям излучения. Поэтому исследование связи параметров бегущих радиальных БМЗ возмущений с наблюдаемыми параметрами микроволнового излучения представляется актуальной задачей.

Моделирование отклика микроволнового излучения из магнитной трубки цилиндрической геометрии было проведено в работах [Reznikova et al. 2015, Kuznetsov et al. 2015]. В указанных работах предполагалось, что ускоренные электроны заполняют весь осциллирующий объём. Однако наблюдения показывают, что корональные петли, которые выглядят одиночными, в данных с более высоким пространственным разрешением распадаются на систему более тонких петель, каждая из которых может служить источником микроволнового излучения [Zimovets et al. 2013]. Но эффект, когда не весь объём, возмущаемый волной, а только его часть, излучает в микроволновом диапазоне, исследован не был. Поэтому **целью данной работы** является исследование зависимости наблюдаемых величин микроволнового излучения от параметров волновода и локализации в нём ускоренных электронов, от параметров радиальной БМЗ волны, а также от положения наблюдателя относительно волновода.

Модель и исходные уравнения

Рассматривается волновод в виде двумерного слоя, вытянутого вдоль оси Z , плотность которого меняется в поперечном направлении X и однородна в продольном направлении Z . Слой помещён во внешнее однородное магнитное поле B_0 так, что ось слоя совпадает с направлением поля.

Распределение невозмущённой плотности тепловой плазмы ρ_0 и поперёк слоя шириной w можно описать непрерывной функцией (Рис. 1b):

$$\rho_0(x) = \rho_{max} \operatorname{sech}^2 \frac{x}{w} + \rho_{\infty}. \text{ Определим контраст плотности как } d = \frac{\rho_{max} + \rho_{\infty}}{\rho_{\infty}}$$

В приближении линейных амплитуд, возмущения плотности и магнитного поля в волне могут быть выражены через скорость поперечного возмущения плазмы \tilde{V}_x :

$$\tilde{\rho} = - \int \frac{\partial(\rho_0 \tilde{V}_x)}{\partial x} dt, \quad \tilde{B}_x = B_0 \int \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial z} dt, \quad \tilde{B}_z = -B_0 \int \frac{\partial \tilde{V}_x}{\partial x} dt, \quad \tilde{V}_x(x, z, t) = AU(x) \cos(k[V_{ph}t - z]),$$

$U(x) = \frac{\sinh(x/w)}{\cosh^\lambda((x/w))}$ - поперечная структура возмущения A - амплитуда возмущения ($A \ll 1$), k - волновое число, $V_{ph} = \omega/k$ - фазовая скорость волны, определяемая дисперсионным уравнением:

$\frac{|k|w}{C_{A0}^2} (V_{ph}^2 - C_{A0}^2) - \frac{2}{|k|w} = \frac{3}{C_{A\infty}} \sqrt{C_{A\infty}^2 - V_{ph}^2}$, C_{A0} и $C_{A\infty}$ - значения альфвеновской скорости на оси слоя и на бесконечности.

Возмущённые значения $\rho = \rho_0 + \tilde{\rho}$, $B_z = B_0 + \tilde{B}_z$, $B_x = \tilde{B}_x$ показаны на Рис. 1 (а, с, d).

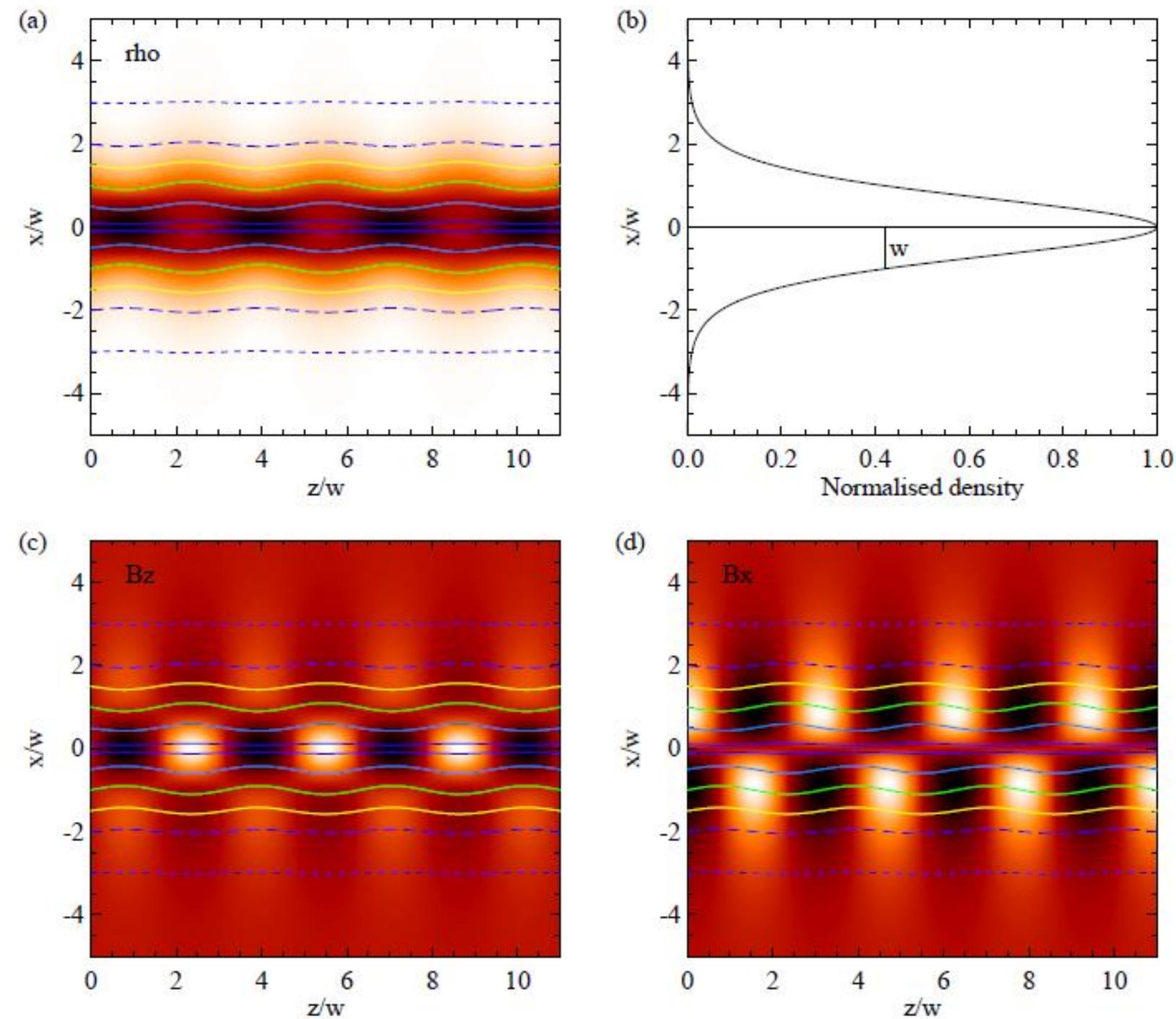
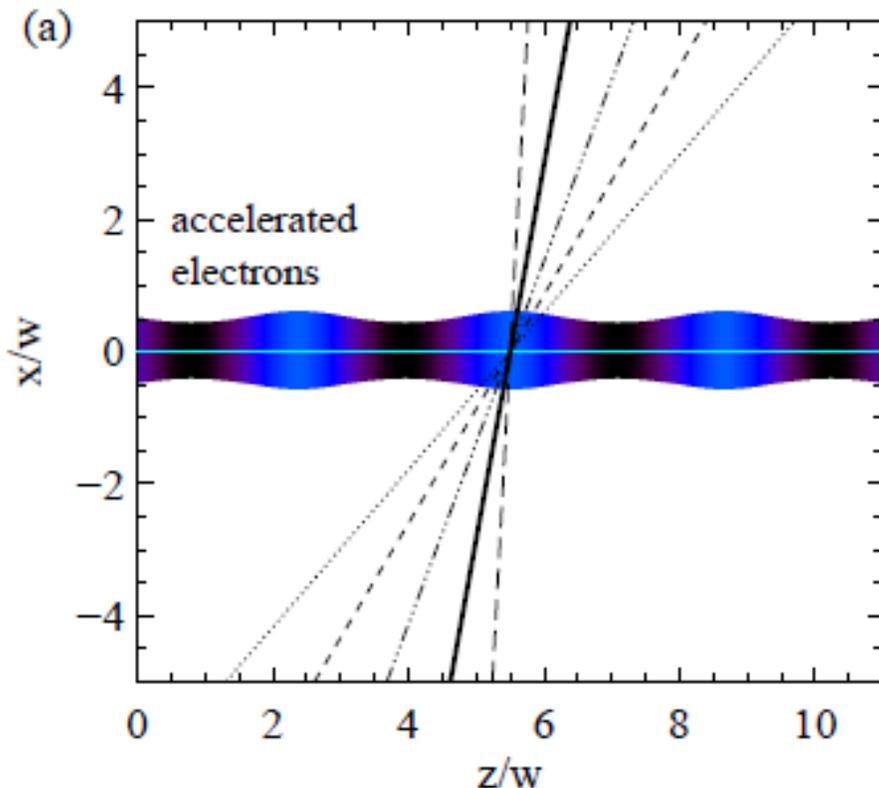


Рис. 1. Распределение (а) возмущённой плотности и (б) невозмущённой плотности (за вычетом ρ_{\max} и нормированной на ρ_{∞}) в направлении поперёк оси слоя (ось X). Распределения возмущённых компонент магнитного поля B_z (с) и B_x (д). Градиент цвета в тёмную сторону соответствует большим значениям, а градиент в светлую сторону - меньшим. Области, в которых присутствуют ускоренные электроны, ограничены парами магнитных силовых линий одинакового цвета и стиля. Ширины областей в невозмущённом состоянии равны $r/w = x(z=0)/w$.

Источник радиоизлучения

Источник микроволнового излучения - область, заполненная нетепловыми электронами с изотропным распределением поpitch-углам. Область ограничена силовыми линиями магнитного поля, проведенными симметрично относительно оси слоя на расстоянии $x = r$ при $z = 0$ так, что удовлетворяется условие постоянства магнитного потока между ними. Уравнение магнитной силовой линии:

$$\frac{dx(z)}{dz} = \frac{B_x(x, z)}{B_0 + B_z(x, z)}$$



Для вычисления параметров микроволнового излучения использовались «быстрые гиротронные коды» [Fleishman, Kuznetsov, 2010], <https://github.com/kuznetsov-radio/gyrosynchrotron>, учитывающие вклад гиротронного и тормозного излучений.

Рис. 2. Распределение возмущённой плотности ускоренных электронов в источнике ГС излучения для $r/w = 0.5$. Более тёмные участки соответствуют большей плотности ускоренных электронов, а более светлые - меньшей. Разные стили соответствуют разным углам зрения θ .

Результаты расчётов

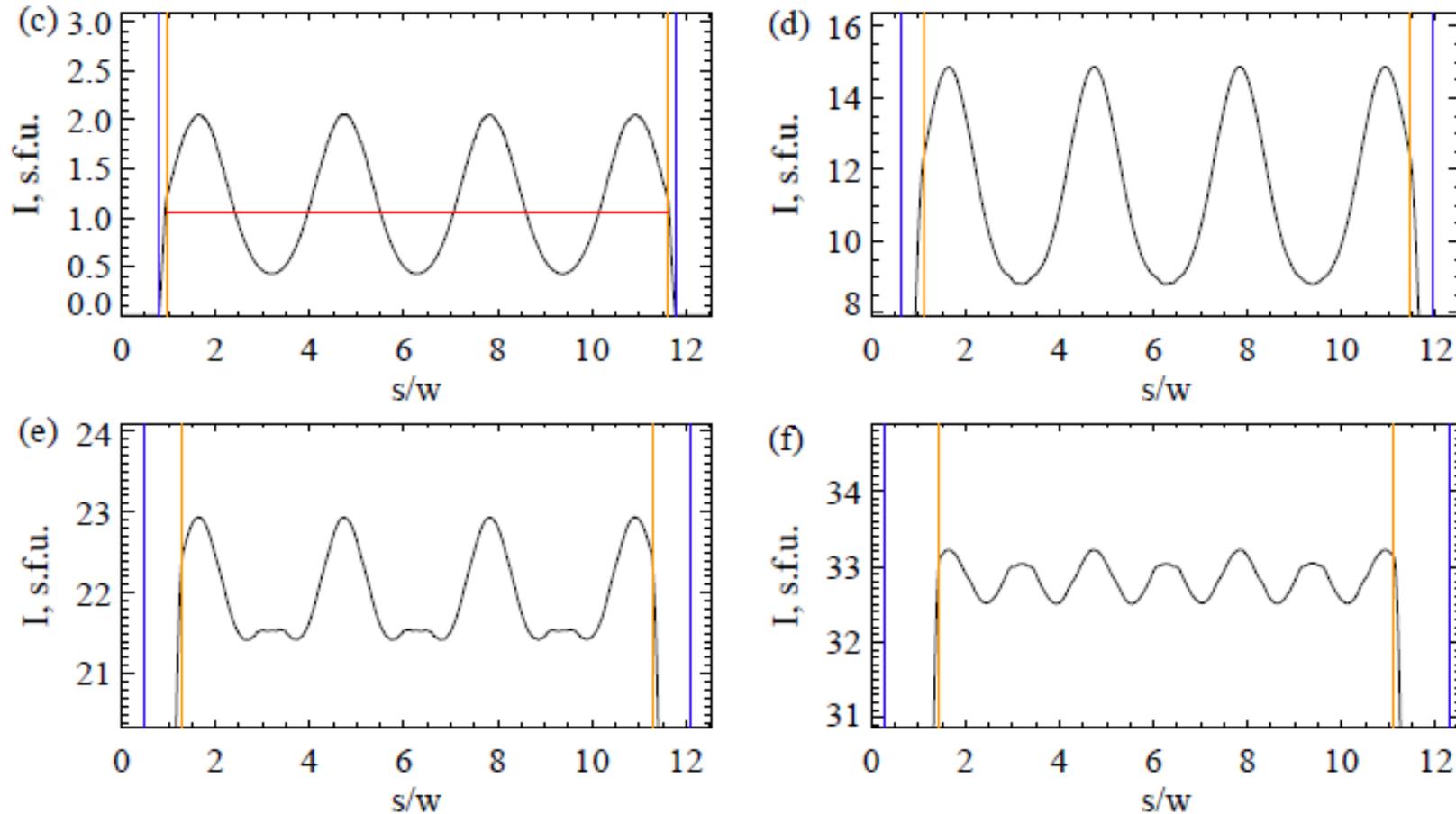


Рис. 3. Полные профили интенсивности микроволнового излучения на 17 ГГц с учётом вклада тормозного и ГС излучений для областей ускоренных электронов разной толщины: (c) $r/w = 0.1$, (d) $r/w = 1.0$, (e) $r/w = 2.0$, (f) $r/w = 3.0$, для угла $\theta = 80^\circ$, $A = 0.1$, $d = 10$. На панели (c) показан соответствующий уровень микроволнового излучения из невозмущённого слоя (красная линия). На панелях (e) и (f) видно, что при определённых сочетаниях параметров наблюдается либо полное исчезновение периодического отклика или удвоение его частоты.

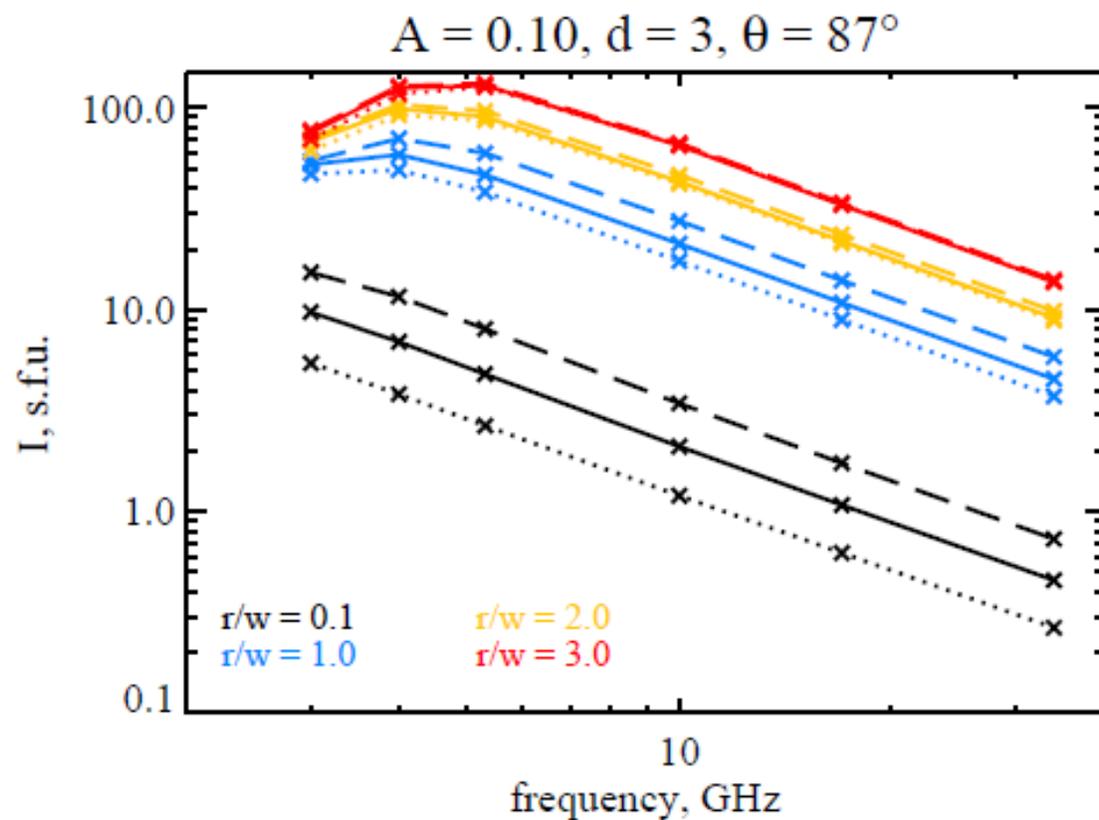


Рис. 4. Спектры интенсивности микроволнового излучения, полученные интегрированием вдоль луча зрения, для четырёх ГС источников с поперечными размерами r/w и для параметров модели $\theta = 87^\circ$, $A = 0.1$, $d = 3$ (а). Спектры интенсивности излучения невозмущённого слоя показаны сплошными линиями. Штриховыми линиями показаны спектры излучения возмущённого слоя в максимуме колебаний интенсивности (см. Рис. 3), а пунктирными - в минимуме.

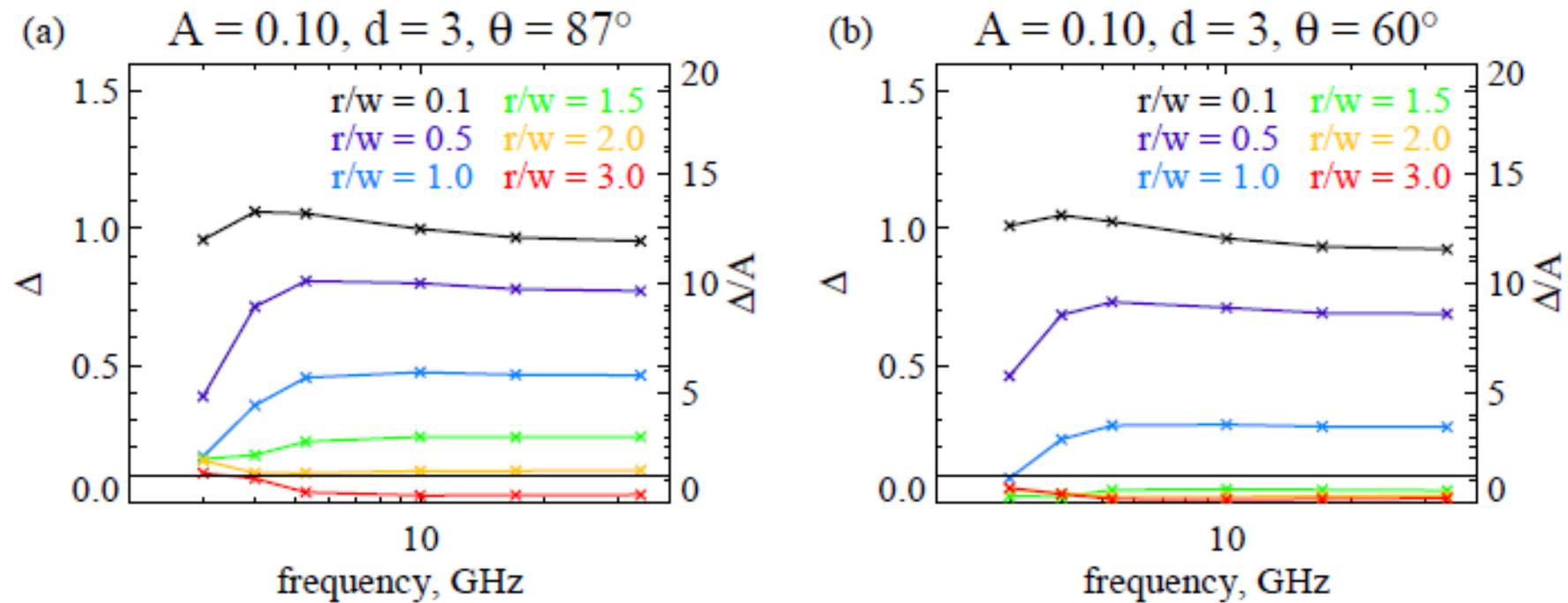


Рис. 5. Глубина модуляции, Δ , микроволнового излучения на шести частотах для амплитуды БМЗ волны $A = 0.1$, контраста плотностей $d = 3$ и углов зрения $\theta = 87^\circ$ (a) и $\theta = 60^\circ$ (b). На каждой панели разными цветами показаны результаты для разного размера r/w областей, содержащих ускоренные электроны. Горизонтальной чёрной прямой показано значение амплитуды A исходной БМЗ волны. Правая вертикальная ось соответствует значениям Δ / A .

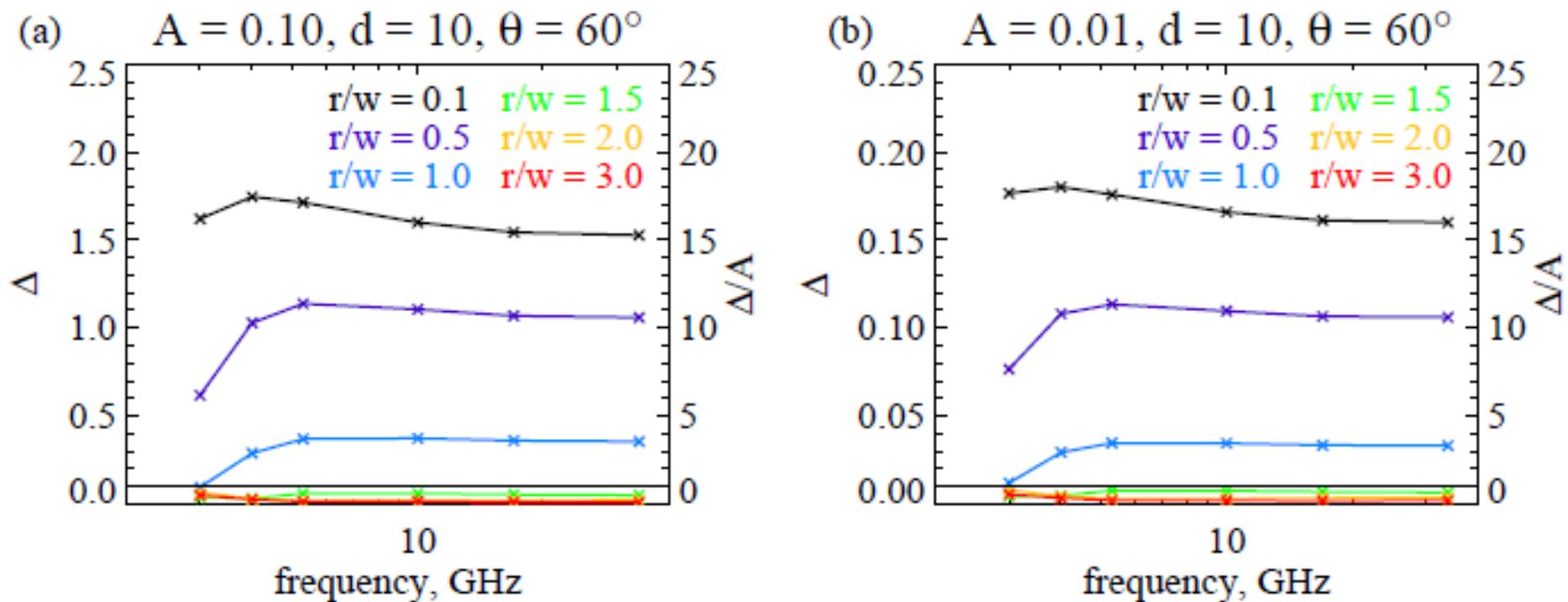


Рис. 6. Глубина модуляции, Δ , микроволнового излучения на шести частотах для разных амплитуд БМЗ волны: $A = 0.1$ (a) $A = 0.01$ (b), показанных горизонтальными чёрными прямыми, для контраста плотностей $d = 10$ и угла зрения $\theta = 60^\circ$ и разных значений r/w .

Заключение

Исследован наблюдательный отклик микроволнового излучения на возмущение поперечно-неоднородного плазменного слоя, вытянутого вдоль однородного внешнего магнитного поля, бегущей вдоль него радиальной быстрой магнитозвуковой (БМЗ) волной. Двумерное моделирование проведено в рамках аналитического решения системы линеаризованных уравнений магнитогидродинамики.

Источником гиросинхротронного (ГС) излучения являются ускоренные электроны, заполняющие только часть слоя. Этим данное исследование отличается от предыдущих, в которых ускоренные электроны считались распределёнными по всему осциллирующему объёму.

Получено, что для ГС источников с поперечным размером, существенно меньшим ширины слоя, для всех углов зрения наблюдается усиление микроволнового отклика на БМЗ волну: глубина модуляции излучения на порядок превышает исходную амплитуду волны, в то время как для ГС источников размером больше ширины слоя найден обратный эффект.

Контраст глубины модуляции излучения узких и широких источников растёт с повышением контраста плотностей в слое и вне его.

Найдено, что микроволновый отклик на БМЗ волну слоя является нелинейным, что при определённых сочетаниях параметров приводит к полному исчезновению периодического отклика или к удвоению его частоты.