

КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В МАГНИТОСФЕРЕ

П. А. Беспалов¹, М. Parrot², J. Manninen³

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

²LPC2E/CNRS, Orlersans, France

³ Sodankyla Geophysical Observatory, Finland

С о д е р ж а н и е

Введение

Плазменный магнитосферный мазер

Медленное эффективное насыщение поглощения в ПММ

Солитонное решение и его свойства

Примеры короткопериодических излучений в космических и наземных экспериментах

Заключение

К о н ф е р е н ц и я «Физика плазмы в солнечной системе»

14-18 февраля 2011 г., ИКИ РАН



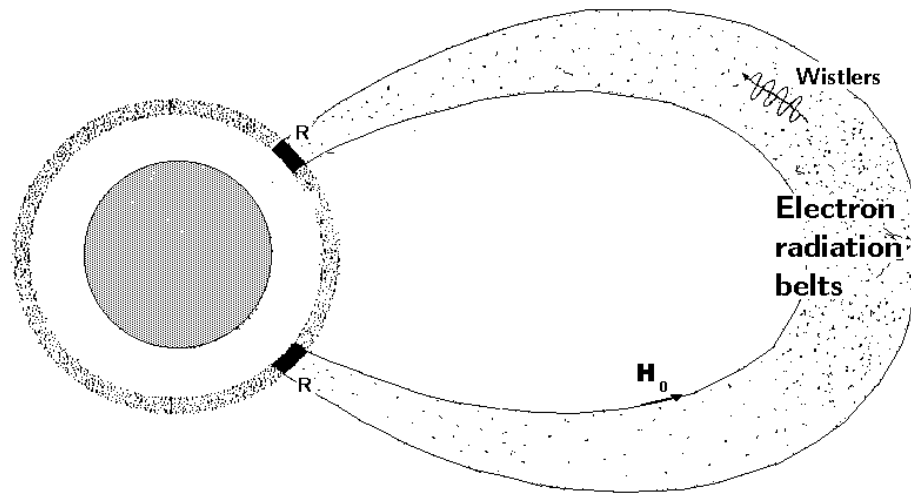
Введение

В рамках оригинального формализма ранее было получено точное решение в виде распространяющегося между областями отражения электромагнитного солитона огибающей с частотным дрейфом заполнения в неоднородном плазменном мазере с неэквидистантным частотным спектром резонатора. Применение теории к плазменному магнитосферному мазеру позволило предсказать условия существования короткопериодических ОНЧ излучений с периодами повторения спектральных форм от 2 до 7 секунд [Беспалов П.А.. Пассивная синхронизация мод в мазерах с неэквидистантным спектром. ЖЭТФ, 1984, т. 87, № 12, .с. 1894-1904; Besspalov P.A. Effective saturation of absorption in a plasma magnetospheric maser. In book: Nonlinear Space Plasma Physics, R.Z. Sagdeev -Editor-in-Chief, American Institute of Physics, 1993, p.339-346]. Уровень экспериментальных данных в то время не давал возможности четко выделить такие излучения.

Развитие аналитического формализма дало возможность выразить феноменологические коэффициенты теории через конкретные характеристики электронных радиационных поясов и параметры магнитосферного резонатора. Реализованы расчеты спектров короткопериодических ОНЧ излучений. Результаты расчетов сопоставлены с высококачественными современными спутниковыми и наземными экспериментальными данными. В итоге проделанной работы четко выделены короткопериодические ОНЧ излучения и объяснены их основные свойства. Полученные результаты важны для диагностики магнитосферы, включая скрытые параметры, такие как величина и угловая зависимость мощности естественных источников энергичных электронов в области радиационных поясов.

Magnetospheric plasma maser

[Bespalov P.A, Trakhtengerts V.Yu., 1980]



Research in recent decades has shown that the regions of the radiation belts (RB) of the Earth and Jupiter, if cyclotron instability develops in them, are largely similar in their physical properties to laboratory masers and lasers.

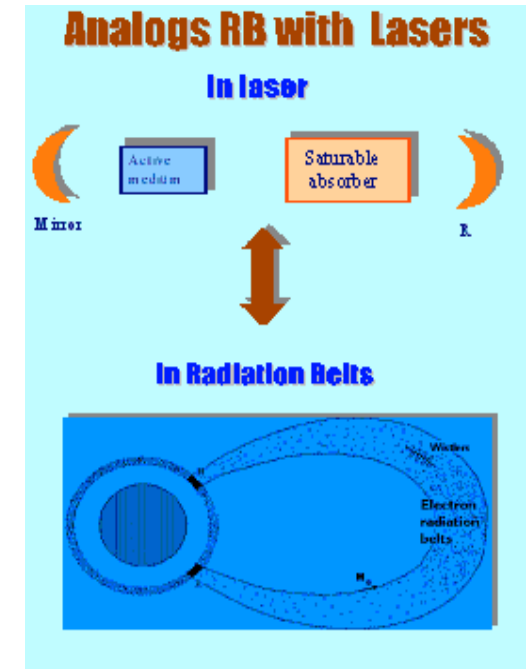
- In a magnetospheric plasma maser (MPM) the relatively dense magnetised plasma and the conjugate ends of a magnetic trap form a quasioptical resonator for electromagnetic waves.
- An active substance consists of the plasma of the RB having a characteristic loss cone in velocity space.
- The nonequilibrium of the distribution function lead to a cyclotron instability development, the increment of which determines the balance between the processes of induced emission and absorption.
- The sources of energetic particles fill the pumping role.
- The working modes in MPM are whistler and Alfvén waves, which are channelled by the magnetic field and, being reflected from the ends of the magnetic trap.

Saturable absorber

In laboratory lasers extensive use is made of saturating absorbers – specially chosen nonlinear elements in which, for a certain frequency range, absorbers – specially chosen nonlinear elements in which, for a certain frequency range, absorption decreases with an increase in the intensity of the electromagnetic radiation.

In MPM in a number of cases with an increase in the energy density of electromagnetic waves, quasilinear relaxation occurs in such a way that the increment of cyclotron instability does not decrease but increase due to variation of the anisotropy of the distribution function [Bespalov P.A., 1982].

Passive synchronization of modes may develop, in which SP electromagnetic signals is provided by the formation of a nonlinear wave packet propagation between conjugate regions of the ionosphere. A study of the causes and consequences of effective saturation of absorption permits a better understanding of conditions of excitation of SP emission in the whistler range, as well as pearls in the range of Alfvén waves.



Slow effective saturation of absorption [Bespalov P.A., 1984; 1993]

Equation for the envelope of a pulse sequence

In the linear approximation a maser ($\Delta t \sim T_{gr} \gg T_b$) is characterised by a complex coefficient of transmission $G = \Gamma + i\Phi$ from input to input. We assume that a pulse $E_0(t)$, short compared with period T_{gr} of group propagation, with spectrum $E_0(\omega)$ is applied to the maser input. With allowance for the transmission coefficient ($\Gamma(\omega) < 0$)

$$E(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(\omega) e^{-i\omega t} (1 + e^G + e^{2G} + \dots) d\omega = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(\omega) e^{-i\omega t} \frac{e^{-i\omega t}}{1 - e^G} d\omega.$$

To clarify the asymptotic laws, we can substitute the transmission coefficient in the form

$$G = g + i\varphi + iT_{gr}\Omega - \Delta\Omega^2, \text{ where } \Omega = \omega - \omega_0.$$

We have expression for envelope $\tilde{E}(t) = E(t)e^{i\omega_0 t}$:

$$\tilde{E}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(\omega_0 + \Omega) \frac{e^{-i\Omega t}}{1 - (1 + g - \Delta\Omega^2) e^{i(\varphi + 2T_{gr}\Omega)}} d\Omega.$$

Therefore, the envelope of the individual pulse satisfies the equation

$$\Delta \frac{\partial^2 \tilde{E}}{\partial t^2} + \delta e^{i\psi} \frac{\partial \tilde{E}}{\partial t} + (1 + g - e^{i\psi}) \tilde{E} = 0, \text{ where } \Delta = \Delta_R + i\Delta_I, \delta = T_p - T_{gr}, \psi \text{ are constants.}$$

Nonlinear interaction in an active medium

The distribution function of the energetic particles in the region of minimum of magnetic field varies in accordance with the equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial v_i} \left(D_{ij} |\tilde{E}|^2 \frac{\partial f}{\partial v_j} \right),$$

where $D_{ij}(v)$ are known functions. Then the amplification of waves in a single passage through the resonator is determined by the expression

$$g_{eff} = g + \int K_i \frac{\partial (f - f_0)}{\partial v_i} d^3 v.$$

Here $K_i(v)$ are known functions; g and $f_0(v)$ correspond to the time long before the arrival of the next pulse. For a relatively low energy in the pulse, we can write:

$$g_{eff} = g + \alpha \int_{-\infty}^t |\tilde{E}|^2 dt - \rho \left(\int_{-\infty}^t |\tilde{E}|^2 dt \right)^2.$$

The explicit form of the coefficients is given in [6], where the possibility of the realisation of the inequalities $g < 0, \alpha > 0$ and $\rho > 0$ is also shown.

Then the problem of determining the shape of the envelope of a pulse sequence comes down to the solution of the nonlinear equation

$$\Delta \frac{\partial^2 \tilde{E}}{\partial t^2} + \delta e^{i\psi} \frac{\partial \tilde{E}}{\partial t} + \left[1 + g_{eff} - e^{i\psi} \right] \tilde{E} = 0.$$

Soliton solution and its properties

It is easy to ascertain by a direct test that a soliton solution can be sought successfully in the form

$$\tilde{E} = E_p \left(\cosh \frac{t}{t_p} \right)^{ia-1} \exp \left[i \left(b \frac{t}{t_p} \right) \right],$$

where E_p, t_p, a, b are constants which obtained as functions of $\Delta_I / \Delta_R, g, \rho / \alpha^2$. For example

$$a = \frac{1}{2\Delta_t} (-3\Delta_R + \sqrt{9\Delta_R^2 + 8\Delta_t^2}).$$

The mean frequency $\langle \omega(t) \rangle$ of the dynamic spectrum of the radiation varies within a pulse as

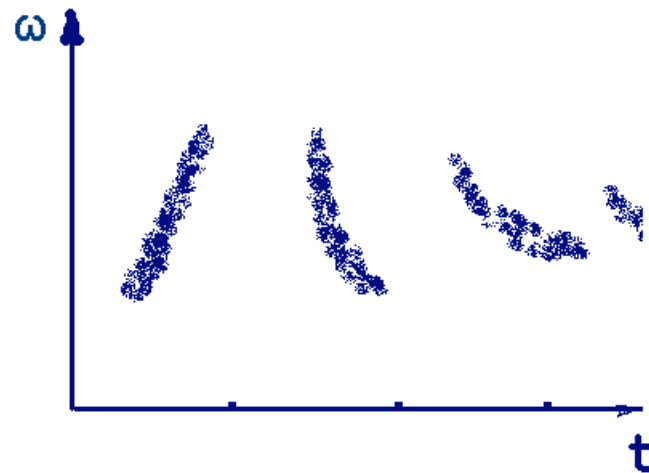
$$\langle \omega \rangle = \omega_0 - \frac{b}{t_p} - \frac{a}{t_p} \tanh \frac{t}{t_p},$$

where

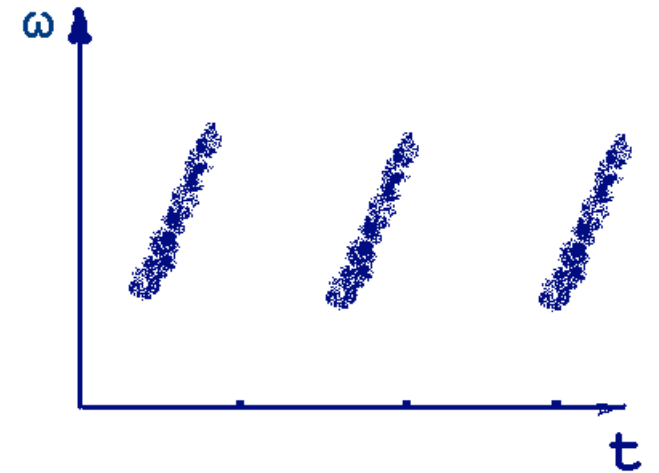
$\Delta_I = -(1/2) (\partial T_{gr} / \partial \omega) > 0$ for whistlers, while for Alfvén waves $\Delta_I < 0$.

The solution shows that the period between two successive pulses

$$T_p \sim T_{gr}.$$



Without QL effects



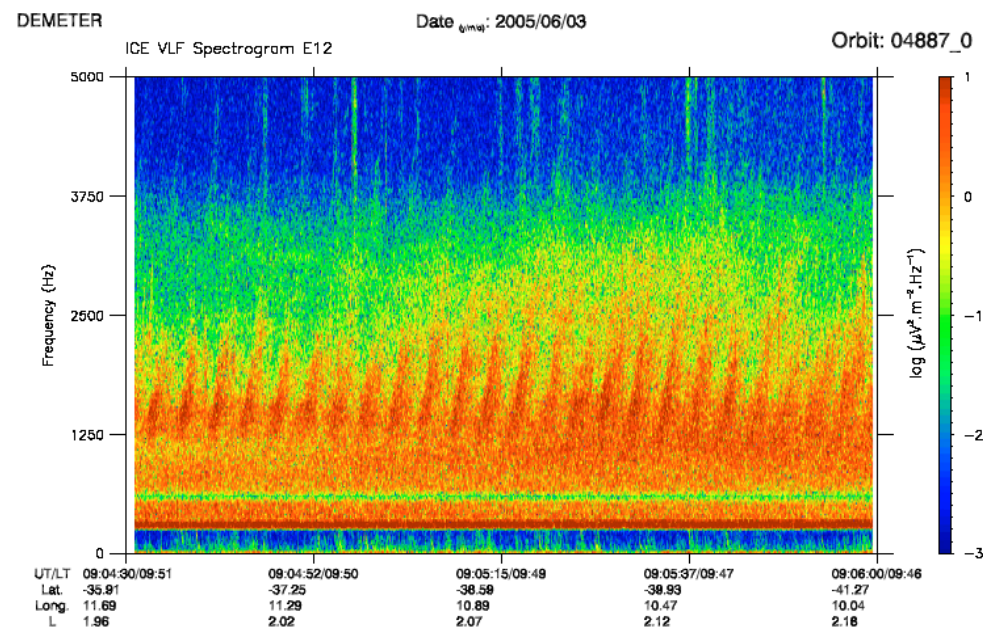
Whith QL effects

Space and ground-based examples of short-period VLF emissions

[Bespalov P.A., Parrot M., Manninen J., 2010]

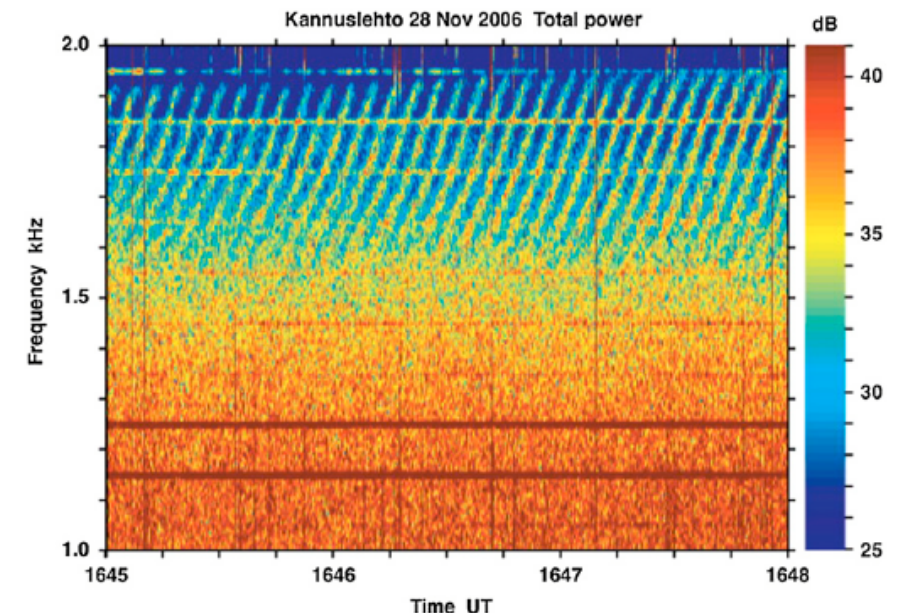
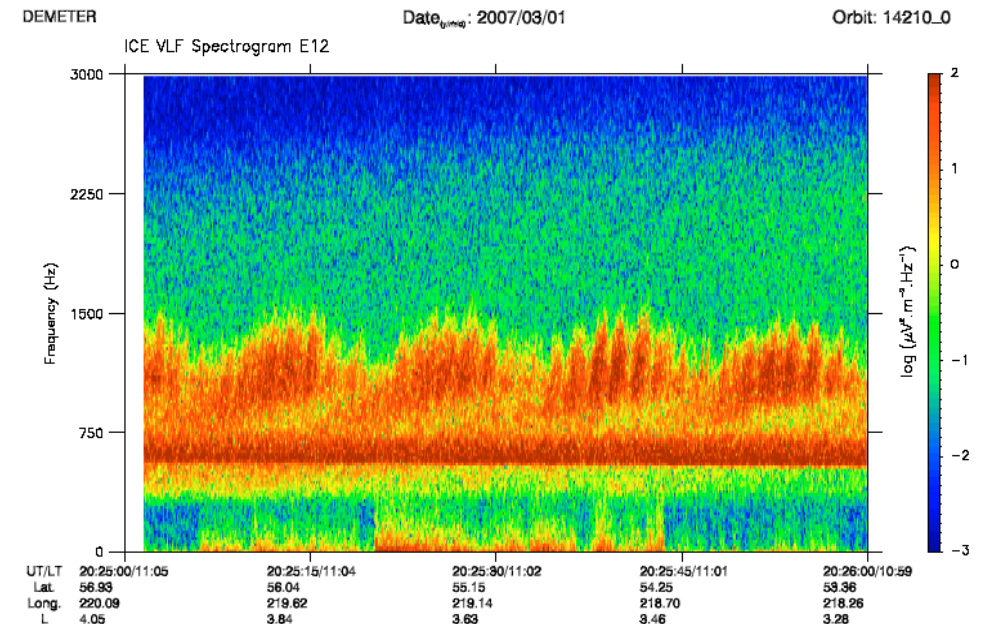
Among many different types of natural VLF emissions there are SP emissions which have a spectral form repetition with periods of between 2 and 7 seconds. Such spectrograms are recorded by the low-altitude (710 km) satellite DEMETER.

Figure shows a spectrogram of data recorded on June 3rd 2005 during 90 seconds between frequencies of 0 and 5000 Hz, when the satellite was in burst mode. Clear SP emissions can be observed between 1200 and 2500 Hz, with a period of 3.65 seconds. These occur at mid-latitude during the recovery phase of a magnetic storm. The regularity and shape of these elements, their location at mid-latitude, and their period indicate that these SP emissions cannot be mistaken with chorus. The cut-off frequency, observed to be at 228 Hz, is the bi-ion frequency which is close to the proton gyrofrequency (312 Hz at 09:04:30 UT). At higher frequencies the vertical lines are due to whistlers.



Nest Figure displays a spectrogram recorded on March 1st 2007 during a minute interval, between frequencies of 0 and 3000 Hz. The event occurred during a period of moderate magnetic activity. SP emissions with periods of 1.73 s are observed inside QP emissions between frequencies of 800 and 1500 Hz. Here also, they are very different from chorus emissions. As in the previous figure the cut-off frequency (570.3 Hz at 20:25:00 UT, 524.7 Hz at 20:26:00 UT) is the bi-ion frequency. At lower frequencies, electrostatic waves are seen. Furthermore, the spectrogram confirms theoretical conclusions about the general prerequisites to trigger SP and quasi-periodic (QP-2) VLF emissions.

Many interesting examples of magnetospheric VLF emissions were obtained on the Earth's surface in the experiments performed at Sodankyla Geophysical Observatory (SGO). In particular, SP VLF emissions were registered. One example of a SP spectrogram from Kannuslehto at L=5.4 can be seen in Figure. Here, the period of these SP emissions is approximately 5 s.



These emissions are in agreement with the examined theoretical formalism.

Заключение

В земной магнитосфере имеется несколько основных типов естественных ОНЧ-излучений и каждый из них отвечает определенному физическому процессу. Эта работа посвящена экспериментальному и теоретическому изучению естественных короткопериодических ОНЧ-излучений, в которых спектральные формы повторяются с периодом от 2 до 7 секунд. SP излучения были уверенно зарегистрированы в космических экспериментах на спутнике DEMETER и по наземным данным обсерватории SGO. По нашему мнению имеется несколько экспериментальных фактов, которые определяют существование нового механизма генерации этих излучений. Прежде всего, эти излучения никогда не трансформируются в хоровые элементы или в квазипериодические излучения (QP 1, QP 2) посредством плавного изменения периода повторения спектральных форм. Это является экспериментальным доказательством уникальности SP излучений. Далее SP излучения сохраняют свои спектральные формы от импульса к импульсу и этим отличаются от многоскачковых свистов.

В данной работе получены следующие результаты:

- * Развита теория пассивной синхронизации мод в плазменном магнитосферном мазере.**
- * Показано, что рассчитанные на этой основе спектры электромагнитных излучений согласуются с высококачественными спутниковыми и наземными экспериментальными данными о короткопериодических ОНЧ излучениях с секундными периодами повторения спектральных форм.**
- * Предложены новые методы диагностики величины и угловой зависимости мощности естественных источников энергичных электронов.**