

УДК 537.86:539.12

ИОНОСФЕРНАЯ АНТЕННА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ, ФОРМИРУЕМАЯ КВ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ УГЛОМ НАКЛОНА ГЛАВНОГО ЛУЧА

© 2022 г. Д. С. Котик^{1*}, В. А. Яшнов¹

¹Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: dmitry.kotik@nirfi.unn.ru

В проведенных нами экспериментах по формированию в ионосфере движущегося источника типа антенны бегущей волны использовались два мощных радиопередатчика стенда СУРА с несущими частотами, отстроенными на частоту F в ОНЧ диапазоне [Котик и др., 1994]. Каждый из них в качестве излучателя использовал треть антенной решётки стенда с вертикальной диаграммой направленности. В работе рассмотрен более общий случай при излучении КВ волн антенными решетками с произвольным углом наклона главного луча. Показано, что частота F сильно зависит от направления главного луча и может изменяться в широких пределах от единиц до полутора десятков килогерц. При этом возможно согласование скорости волны тока ионосферного источника с фазовой скоростью первых мод волновода Земля-ионосфера

Ключевые слова: ионосфера, нагревный передатчик, движущийся источник, низкочастотное радиоизлучение, волновод Земля-ионосфера.

Для цитирования: Котик Д.С., Яшнов В.А. Ионосферная антенна бегущей волны, формируемая КВ интерферометром с произвольным углом наклона главного луча // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14, № 2. С. 115–121. http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_115

Введение

Ранее нами экспериментально и теоретически была показана возможность создания в ионосфере виртуального источника низкочастотного излучения типа антенны бегущей волны [Котик и др., 1994; Мироненко и др., 1999]. При использовании двух мощных радиопередатчиков работающих на две антенные решётки с вертикальной диаграммой направленности, фазовые центры которых отстоят на расстояние d , с разносом несущих частот $F = f_1 - f_2$, в нижней ионосфере возникает движущийся источник низкочастотного излучения. Фазовая скорость такой антенны бегущей волны (АБВ) совпадает с фазовой скоростью главной моды волновода Земля – ионосфера при выполнении условия $F = fd/h$ (где F – разность несущих частот, h – высота ионосферного источника над поверхностью Земли). На этой частоте наблюдается максимум амплитуды низкочастотного излучения в эксперименте. Нами рассмотрен общий случай при работе нагревной установки с произвольным углом наклона главного луча подрешеток. Исследована зависимость частоты F от направления главного луча. Определены соотношения этой частоты, на которой происходит согласование скорости волны тока источника с фазовой скоростью нескольких первых мод волновода, с параметрами нагревной установки. Эта частота может изменяться в широких пределах от единиц до полутора десятков килогерц. Отметим, что пока экспериментальная проверка в такой постановке не проводилась, хотя технические возможности современных нагревных стендов позволяют поставить подобного рода эксперимент.

Вертикальный луч

В эксперименте с ионосферной антенной бегущей волны использовались два передатчика стенда СУРА, работающие без модуляции с несущими частотами, сдвинутыми на частоту F . Каждый передатчик

был нагружен на свою антенную решетку, фазовые центры которых в пространстве разнесены на расстояние (см. рис. 1). При такой методике максимум суммарной КВ волны будет двигаться вдоль ионосферы, что можно интерпретировать как вращение в пространстве суммарного луча с угловой скоростью $\Omega = 2\pi F$.

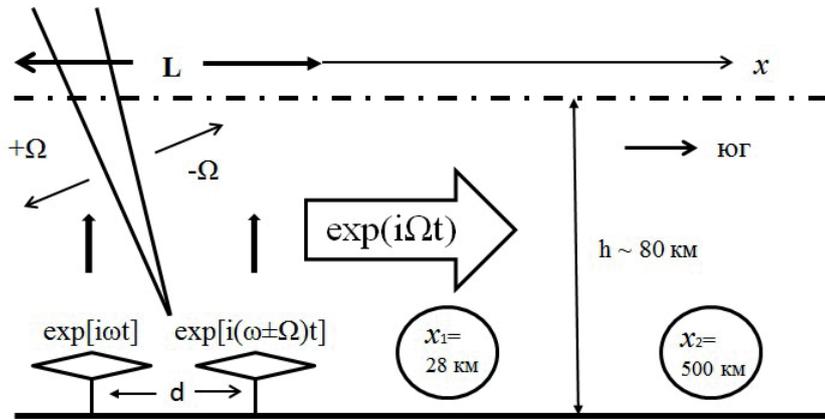


Рис. 1. Схема эксперимента по генерации ОНЧ волн движущимся источником при работе нагревного стенда двумя подрешетками на двух частотах с разнесенными фазовыми центрами

Таким образом, в ионосфере в области с линейными размерами L формируется бегущая волна нелинейного тока на частоте Ω и волновым вектором k_0

$$j(\Omega) = A(\omega, \Omega,) \cos(\Omega t - k_0 x), \quad (1)$$

где в случае зенитного излучения $k_0 = kd/h$, A – коэффициент, связанный с нагревом электронов, k – волновое число высокочастотной волны.

Фазовая скорость этой бегущей волны равна:

$$V_{Ph} = \Omega / k_0 = \Omega h / kd = \frac{\Omega}{\omega} \frac{h}{d} \cdot c, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме.

При заданной геометрии эксперимента (величины h и d) всегда можно подобрать такое соотношение частот Ω/ω , при котором фазовая скорость источника будет равна и, даже превышать скорость света. Это обстоятельство позволяет рассматривать данный тип источника в терминах излучения Вавилова–Черенкова [Мироненко и др, 1999].

После презентации в 1986 г. результатов эксперимента на стенде СУРА с АБВ на Суздальском симпозиуме URSI, аналогичные эксперименты были проведены на стендах в Аресибо [Werner et al., 1987] и в Тромсё [Barr et al., 1987]. Затем через 10 лет они были повторены на стендах HIPAS [Villaseñor et al., 1996] и еще через 25 лет на стенде HAARP [Cohen et al., 2008].

Наклонный луч

Рассмотрим теперь более общий случай при работе КВ интерферометра с произвольным углом наклона главного луча. Пусть два излучателя отстоят один от другого на расстоянии d и излучают пучки электромагнитных волн под углом θ_0 (см. рис. 2).

Частота первого излучателя ω , а второго $\omega \pm \Omega$ ($\omega \gg \Omega$). Поля этих излучателей запишем в виде

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{\Phi(\theta)}{r} E_0 \exp\{i[(\omega \cdot t - \vec{k} \cdot \vec{r})]\} \\ E_2 &= \frac{\Phi(\theta)}{r_1} E_0 \exp\{i[(\omega \pm \Omega)t - (\vec{k} \pm \vec{q})r_1]\} \end{aligned} \quad (3)$$

где $|k| = \omega/c, |q| = \Omega/c$, $\Phi(\theta) = \exp\left\{\frac{(\theta - \theta_0)^2}{\Delta\theta^2}\right\}$ – диаграммный множитель. В (3) принято, что у обоих

излучателей идентичные диаграммы направленности, а полуширина диаграммы $\Delta\theta \ll 1$. Поле второй волны можно представить в виде:

$$E_2 = \frac{\Phi(\theta)}{r_0} E_0 \exp\left\{i\left[(\omega \cdot t - kr) \pm \Omega \cdot t + \frac{kd}{r_0} \xi \sin \theta_0 \pm q \cos \theta_0\right]\right\}, \quad (4)$$

где ξ координата вдоль области, ограниченной координатами ξ_1, ξ_2 , подвергнутой облучению. В (4) принято, что при условии $r_2 \approx r \approx r_0(x, h)$

$$r = \sqrt{\xi^2 + h^2},$$

$$r_1 = \sqrt{(\xi - d)^2 + h^2} \approx r - \frac{\xi}{r_0} d.$$

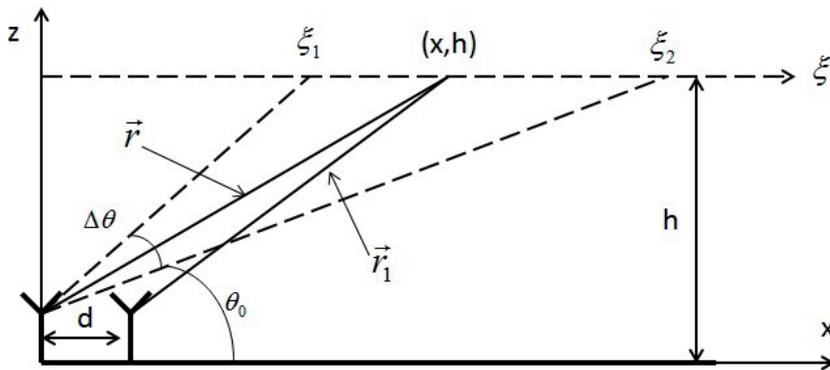


Рис. 2. Схема формирования движущегося ионосферного источника двумя подрешетками нагревного стенда с наклонными диаграммами направленности главного луча

В области «засветки» под действием радиоволн формируется нелинейный ток на комбинационной частоте Ω , плотность которого можем записать в виде

$$j(\Omega) = A(\omega) |E_1 + E_2|^2, \quad (5)$$

где $A(\omega)$ – коэффициент нелинейного преобразования, зависящий от частоты воздействия и параметров ионосферы. Здесь мы не приводим $A(\omega)$ в явном виде, однако его легко определить по формулам работы [Kotik, Trakhtengerts, 1975]. Подставляя в (5) выражения для полей E_1, E_2 получим

$$j(\Omega) = 2A(\omega) E_0^2 \cdot \cos(\Omega t - K_0 \xi),$$

$$K_0 = \frac{kd}{h} \sin^3 \theta_0 \pm q \cdot \cos \theta_0. \quad (6)$$

Таким образом, в области ионосферы $\{\xi_1, \xi_2\}$ формируется волна нелинейного тока, перемещающаяся вдоль области с фазовой скоростью, (также как и при вертикальном интерферометре)

$$V_\phi = \Omega / K_0 \quad (7)$$

Рассмотрим теперь условия возбуждения волновода Земля – ионосфера источником типа (6). Как известно из теории распространения низкочастотных волн в этом волноводе, поле может быть

представлено в виде суммы собственных мод волновода, каждая из которых распространяется со своей фазовой скоростью $V_\phi = q_n$, где q_n – продольное волновое число моды с номером n ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) (Бреховских, 1973). Согласно этой теории для случая идеального волновода имеем

$$q_{||n} = \sqrt{q^2 - \pi^2 n^2 / h^2} \quad (8)$$

Если фазовая скорость волны тока равна фазовой скорости выбранной моды с номером n , то в этом случае будет выполняться условие синхронизма, и эта мода будет наиболее эффективно возбуждаться бегущей волной тока. Из равенства $q_n = K_0$ получим

$$\frac{kd}{h} \sin^3 \theta_0 \pm q \cdot \cos \theta_0 = \sqrt{q^2 - \frac{\pi^2 n^2}{h^2}}, \quad (9)$$

где $q = \Omega/c$, h – высота волновода, c – скорость света.

Решая (9) относительно частоты Ω получим условия, связывающие разностную частоту передатчиков с параметрами излучения, формирующими нелинейный источник, и геометрическими факторами и определим частоты F_n , на которых выполняются условия синхронизма скорости движения ионосферного источника и данной моды волновода Земля-ионосфера:

$$F_n = \frac{1}{h \sin \theta_0} \left[\sqrt{f^2 d^2 \sin^4 \theta_0 + \frac{c^2 n^2}{4}} \mp f d \sin^2 \theta_0 \cos \theta_0 \right] \quad (10)$$

$$F_n = \Omega_n / 2\pi, f = \omega / 2\pi,$$

знак (–) соответствует частоте второго излучателя ($\omega + \Omega$), знак (+) частоте ($\omega - \Omega$).

Смена знака означает изменение направления движения тока на противоположное. В частном случае зенитного излучения решение упрощается и принимает вид для главной волны $F_0 = fd/h$ (нулевая мода, при $\theta_0 = \pi/2$). На рис. 3 показаны зависимости частот синхронизма F_n от угла наклона главного луча на примере установки, работающей на частоте $f = 4,8$ МГц при $d = 100$ м и $h = 75$ км.

Как можно видеть при применении наклонных лучей для формирования ионосферной АБВ и при соответствующем подборе параметров наземной установки для нагрева ионосферы можно подобрать практически любую излучаемую АБВ частоту в СНЧ и ОНЧ диапазонах.

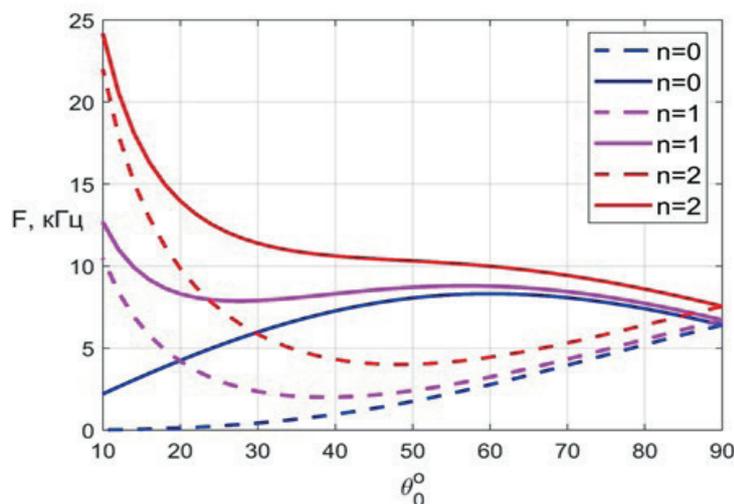


Рис. 3. Зависимость оптимальных для возбуждения волновода Земля – ионосфера частот F_n от угла наклона главного луча. Сплошные кривые соответствуют направлению движения источника на наблюдателя, пунктир – противоположному

Заключение

В экспериментах на Аляске, в Пуэрто-Рико и Тромсё, упомянутых выше, антенные поля делились на две равные половины и интерпретировались в терминах движущегося источника. Однако в последнее десятилетие появились работы, в которых при аналогичной постановке эксперимента интерпретация проводилась в терминах стрикционной нелинейности в верхней ионосфере, а сама методика эксперимента получила название *beat wave mode* (режим биений) [Kuo et al., 2012], [Tereshchenko et al., 2014], [Jutao Yang et al., 2019]. В данных работах совершенно игнорируется тот факт, что в подобном режиме неизбежно в ионосфере возникает движущийся источник. Зависимость амплитуды такого источника от частоты сильно отличается от случая режима амплитудной модуляции. В приведенных выше работах такое отличие интерпретируется как аргумент в пользу нового стрикционного механизма генерации ОНЧ волн в верхней ионосфере. Отметим, что технические возможности всех существующих сегодня нагревных стенов позволяют реализовать разделение антенных решеток как на две подрешетки с разнесенными фазовыми центрами, так и с совпадающими фазовыми центрами. Дополнительные возможности предоставляют рассмотренные выше режимы с наклонными диаграммами направленности.

Особенно интересна постановка подобного рода исследований в средних широтах (стенд СУРА), при которых не будут наложения эффектов авроральной струи. Отметим, что целесообразно проведение исследований источника типа АБВ с помощью спутников с целью запуска триггерных ОНЧ излучений в магнитосфере. Известно два эксперимента на спутнике DEMETER по измерению ОНЧ сигналов от ионосферного источника при сложных режимах его формирования движущимся лучом. Это эксперимент на Аляске по сравнению эффективности инъекции низкочастотных радиоволн в магнитосферу при использовании пространственного управления лучом (так называемой геометрической модуляции) [Cohen, et al., 2011] и эксперимент на стенде в Тромсё [Белов, 2021]. В последнем нагревный стенд использовался в режиме биений, а интерпретация выполнена в терминах антенны бегущей волны. Сигнал регистрировался на протяжении сотен километров над стендом, в отличие от нескольких десятков километров в узком конусе над стендом в случае амплитудной модуляции. В эксперименте [Cohen, et al., 2011] показано, что применение сложных «геометрических» режимов генерации ОНЧ волн более эффективно для инъекции их в магнитосферу по сравнению с амплитудной модуляцией.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0729-2020-0057) и при финансовой поддержке РНФ (грант № 20-12-00197).

Список литературы

Белов А.С. Особенности генерации и распространения сверх низкочастотных волн, возбуждаемых в ионосфере Земли, при воздействии мощного КВ-радиоизлучения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. 24. (4), 53–62, doi: 10.18469/1810-3189.2021.24.4.53-62.

Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М. : Наука. 1973. 343 с.

Котик Д.С., Митяков С.Н., Мироненко Л.Ф., Рапопорт В.О. Экспериментальные исследования низкочастотного излучения движущегося ионосферного источника // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1994. Т. 37. № 6. С. 783–784.

Мироненко Л.Ф., Рапопорт В.О., Котик Д.С. Эффект Вавилова–Черенкова и Доплер – эффекты от сверхсветового радиозайчика в нижней ионосфере // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 8. С. 740–749.

Barr R., Rietveld M.T., Shtube P., Kopka H., (1987). Ionospheric heater beam scanning: a mobile source of ELF radiation. Radio Sci. 22 (6), 1073–1083. <https://doi.org/10.1029/RS022i006p01073>

Cohen M.B., Inan U.S., Golkowski M., (2008). Geometric modulation: A more effective method of steerable

ELF/VLF wave generation with continuous HF heating of the lower ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 35 L12101, doi.org/10.1029/2008GL034061.

Cohen M.B., Inan U.S., Piddychiy D., Lehtinen N.G., and Golkowski M. (2011). Magnetospheric injection of ELF/VLF waves with modulated or steered HF heating of the lower ionosphere // *J. Geophys. Res.* 116, A06308. <https://doi.org/10.1029/2010JA016194>.

Jutao Yang, Jianguo Wang, Qingliang Li, et al. (2019). Experimental comparisons between AM and BW modulation heating excitation of ELF/VLF waves at EISCAT // *Phys. Plasmas* 26, 082901. <https://doi.org/10.1029/2010JA016194>.

Kotik D.S., V.Yu. Trakhtengerts. (1975). Mechanism of excitation of combination frequencies in ionospheric plasma // *JETP Lett.* 21 (2), 51–51.

Kotik D.S., Mironenko L.F., Mityakov S.N., Rapoport V.O. and Tamoykin V.V. (1986). On possibility of the superlight Cherenkov sources forming by mean of Getmahtsev effect. Proc. of II Suzdal URSI symposium on Modification of the ionosphere by powerful radio waves. Moscow: ISMIRAN press. P. 91–92.

Kuo S., Snyder A., Kossey P., Chang C.-L. and Labenski J. (2012). Beating HF waves to generate VLF waves in the ionosphere // *J. Geophys. Res.* 117 A03318. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JA017076>.

Tereshchenko E.D., Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Gomonov A.D. (2014). Features of amplitude and Doppler frequency variation of ELF/VLF waves generated by «beat-wave» HF heating at high latitudes // *Geophys. Res. Lett.* 41, 4442–4448. <https://doi.org/10.1002/2014GL060376>.

Villaseñor J., Wong A., Song B., Pau J., McCarrick M., Sentman D. (1996). Comparison of ELF/VLF generation modes in the ionosphere by the HIPAS heater array // *Radio Science.* 31 (2), 211–226. <https://doi.org/10.1029/95RS01993>.

Werner D.H., Ferraro A.J., Lee H.S. (1987). Steerable ELF/VLF radiation produced by an array of ionospheric dipoles generated from HF heating. *IEEE Transac. AP-35*, 1022–1030. DOI: 10.1109/TAP.1987.1144214.

IONOSPHERIC TRAVELING WAVE ANTENNA FORMED BY RF INTERFEROMETER WITH AN ARBITRARY ANGLE OF TILT OF THE MAIN BEAM

D. S. Kotik^{1*}, V. A. Yashnov¹

¹*National Research Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia*

**E-mail: dmitry.kotik@nirfi.unn.ru*

It was previously shown that when using two powerful transmitters operating on two antenna arrays with a vertical radiation pattern, the phase centers of which are separated by a distance d with a carrier frequency spacing $F = f_1 - f_2$ a moving source of low-frequency radiation appears in the lower ionosphere. The phase velocity of such traveling wave antenna coincides with the phase velocity of the main mode of the Earth-ionosphere waveguide at the frequency $F = fd/h$ (F is the carrier frequency difference; h is the height of the ionospheric source above the Earth's surface). At this frequency, a maximum in the radiation amplitude is observed in the experiment. The paper considers a more general case when a HF interferometer operates with an arbitrary angle of inclination of the main beam of both emitters. It is shown that the frequency F strongly depends on the direction of the main beam and can vary over a wide range from units to 15 kilohertz. In this case, it is possible to match the velocity of the current wave in the source with the phase velocity of several first modes of the waveguide. In this case, it is possible to match the current wave of the source with the phase velocity of several first modes of the waveguide. It is shown that the frequency F strongly depends on the direction of the main beam and can vary over a wide range from units to 15 kilohertz. In this case, it is possible to match the velocity of the current wave in the source with the phase velocity of several first modes of the waveguide. We note that so far no experimental verification has been carried out in this formulation, although the technical capabilities of modern heating facilities allow such experiments to be carried out.

Keywords: ionosphere, heating transmitter, moving source, low-frequency radio emission, Earth-ionosphere waveguide.