

УДК 537.862; 621.396.673

Моделирование режимов работы плазменной антенны

Н. Н. Богачев, И. Л. Богданкевич, Н. Г. Гусейн-заде

С помощью численного моделирования изучались особенности и режимы работы плазменной несимметричной вибраторной антенны конечной длины и диаметра на частоте сигнала $f_0 = 1,7$ ГГц. Концентрация плазмы изменялась в пределах двух порядков, результаты расчетов сравнивались с аналогичной металлической антенной. Получены распределения составляющих электрических полей антенн в ближней зоне и диаграммы направленности. Приведены диаграммы направленности металлического вибратора, полученные в результате измерения и моделирования в двух программах.

PACS: 52.40.Fd

Ключевые слова: плазменная антенна, численное моделирование, поверхностная электромагнитная волна, металлический несимметричный вибратор, диаграмма направленности.

Введение

В последние годы активно ведутся теоретические, численные и экспериментальные исследования плазменных антенн [1—7]. Основное внимание в работах уделяется исследованиям плазменного несимметричного вибратора (ПНВ) [1, 2, 4—7]. Однако до сих пор малоисследованными вопросами, связанными с плазменными антеннами, являются следующие аспекты: шумовые характеристики плазменной антенны, нелинейные искажения и токовые неустойчивости в плазме газового разряда антенны, определение оптимальных параметров плазмы для работы ПНВ, а также роль поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) в работе антенны.

Проведенное нами исследование было направлено на определение влияния концентрации плазмы на режимы излучения ПНВ и связи ПЭВ с режимами работы антенны.

Ранее при изучении ПНВ с помощью численного моделирования были исследованы такие

параметры и характеристики ПНВ как коэффициенты прохождения и отражения, излучаемая мощность и эффективность [2, 4, 7], диаграммы направленности [2, 4, 5, 7], входное сопротивление [5], функции распределения электронов в плазме [6]. Во всех этих работах рассматривались концентрация плазмы n_e , при которой плазменная антенна близка к металлической (плазменная частота $\omega_p > 10 \cdot 2\pi \cdot f_0$). Но в экспериментальных исследованиях значения концентрации плазмы могут быть таковы, что уже при частотах $f_0 \sim 100$ МГц достигается близкие к пороговому значению $\omega_p \sim \sqrt{2} \cdot 2\pi f_0$, т. е. подобные концентрации плазмы могут приводить к срыву излучения антенны или к возникновению нелинейных искажений в передаваемом сигнале.

В [7] было показано, что для частоты $f_0 = 400$ МГц зависимость излучаемой мощности $P(n_e)$ представляет собой нелинейную функцию. В данной работе для ПНВ на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц для значений плазменной частоты в диапазоне $\sqrt{2} \cdot 2\pi f_0 \leq \omega_p \leq 15 \cdot 2\pi \cdot f_0$ были получены пространственные распределения составляющих электрического поля в ближней зоне, а также диаграммы направленности (ДН) ПНВ.

Численное моделирование и экспериментальные измерения ДН

Общая схема четвертьволнового несимметричного вибратора длиной $l_{ант}$, диаметром $d_{ант} = 2r_{ант}$ и металлическим экраном диаметра $D_{экр} = 2R_{экр}$ изображена на рис. 1.

Богачев Николай Николаевич, аспирант¹, младший научный сотрудник².

Богданкевич Ирина Леонидовна, доцент¹, старший научный сотрудник².

Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы, зав. кафедрой¹, зав. отделом².

¹Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА). Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

Тел. 8 (906) 039-79-22. E-mail: bgniknik@yandex.ru

²Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН. Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8 (499) 135-02-47.

Статья поступила в редакцию 16 августа 2014 г.

© Богачев Н. Н., Богданкевич И. Л., Гусейн-заде Н. Г., 2014

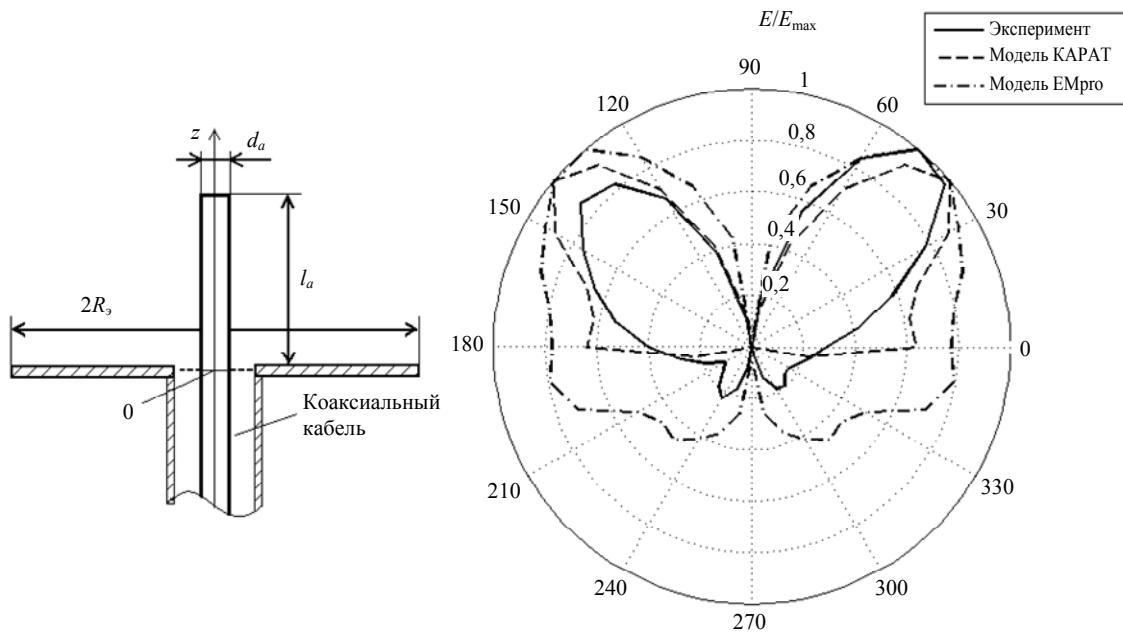


Рис. 1. Схема несимметричного вибратора (слева) и диаграммы направленности для МНВ по результатам моделирования и измерения (справа)

В данном разделе исследовалась ДН для металлического несимметричного вибратора (МНВ) с $l_{ант} = 4,1$ см, $d_{ант} = 0,3$ см и $D_{экp} = 18$ см на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц в дальней зоне, при этом как численно в программах код КАРАТ (метод конечных разностей во временной области) и САПР EMpro (метод конечных элементов) [9], так и экспериментально в безэховой камере. Исследования ДН для МНВ различной длины, диаметра, а также размеров экрана см. в [10].

Модель МНВ была создана в полном электромагнитном коде КАРАТ [8, 9] в 2,5-D-геометрии. Рассматривается осесимметричный случай с идеальным поглощающим слоем (ИПС, PML) [8, 9] на границах счетной области. Металлический экран и штырь МНВ были заданы как идеально проводящие поверхности. Моделирование осуществлялось методом конечных разностей во временной области (МКРВО).

Модель в программе EMpro создана в трехмерной геометрии в системе координат xuz с изменяемыми размерами и идеальным поглощающим слоем на краях счетной зоны. Расчет проводился методом конечных элементов (МКЭ) в блоке Agilent FEM Simulator.

На рис. 1 приведены результаты численного моделирования и измерения диаграммы направленности для МНВ с $l_{ант} = 4,1$ см, $d_{ант} = 0,3$ см и $D_{экp} = 18$ см на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц. Как видно из графиков, диаграммы направленности хорошо совпадают по основным лепесткам, имея различия в уровне и положении боковых лепестков. Для диаграммы направленности, полученной в коде

КАРАТ, отклонение лепестков объясняется близким расположением границы счетной области с поглотителем к задней стенке экрана.

Численное моделирование ПНВ в коде КАРАТ

В данном разделе представлены результаты численного моделирования плазменного и металлического (МНВ) вибратора ($l_{ант} = 4$ см, $d_{ант} = 1$ см) с бесконечным размером экрана, $D_{экp} = \infty$.

Плазма в модели задавалась как среда, описываемая по теории Друде, где диэлектрическая проницаемость плазмы определяется по формуле (1):

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_0 \left(1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(iv_e - \omega)} \right), \quad (1)$$

где $\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / m_e \epsilon_0}$ — плазменная частота, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства, v_e — частота электрон-электронных столкновений.

В решаемой задаче через коаксиальный кабель на плазменную (металлическую) антенну подавался импульс гауссовой формы длительностью $\tau_u = 15$ нс на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц. Параметры плазмы изменялись с помощью изменения концентрации плазмы n_e (частота столкновений электронов оставалась постоянной $v_e = 10^7$ с⁻¹). Характерные параметры, при которых проводился расчет, представленные в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Соотношение ω_p и f_0	Значение ω_p , рад/с	Значение n_e , см ⁻³
1	$\sqrt{2} \cdot \pi f_0$	$1,58 \cdot 10^{10}$	$8,0 \cdot 10^{10}$
2	$5 \cdot 2\pi f_0$	$5,35 \cdot 10^{10}$	$9,1 \cdot 10^{11}$
3	$10 \cdot 2\pi f_0$	$1,07 \cdot 10^{11}$	$3,6 \cdot 10^{12}$

По результатам моделирования в коде КАРАТ были построены зависимости пространственного распределения составляющих $E_z(r)$ и $E_r(z)$ на частоте $f_0 = 1,7$ ГГц (рис. 2 и 3) для плазменной и металлической антенн $l_{ант} = 4$ см, $d_{ант} = 1$ см, $D_{экр} = \infty$. Для плазменной антенны зависимости приведены для параметров из табл. 1.

Так как поле четвертьволнового вибратора имеет структуру Е-волны ($E_\varphi = 0$), а в дальней зоне приобретает структуру ТЕМ-волны [11] и состав-

ляющая $E_r(r)|_\infty = 0$, то исследовалась зависимость $E_z(r)$. Выбор $E_r(z)$ обусловлен пропорциональностью этой составляющей распределению заряда Q вдоль антенны.

На рис. 2 представлены распределения поля $E_r(z)$ для МНВ и ПНВ в трех режимах работы. В первом режиме (параметры соответствуют пункту № 1 в табл. 1) при $n_e = 8,0 \cdot 10^{10}$ см⁻³ происходит распространение поверхностной волны с длиной $\lambda \approx 1,5$ см вдоль плазмы (кривая 1). Вторым режим (№ 2 в табл. 1) — переходной для концентрации плазмы $n_e = 9,1 \cdot 10^{11}$ см⁻³ (кривая 2). Третий режим (№ 3 в табл. 1) — режим излучения волны в пространство $n_e = 3,6 \cdot 10^{12}$ см⁻³ поле $E_r(z)$ для плазмы с концентрацией $n_e = 3,6 \cdot 10^{12}$ см⁻³ (кривая 3) близко к случаю металлического несимметричного вибратора (кривая 4).

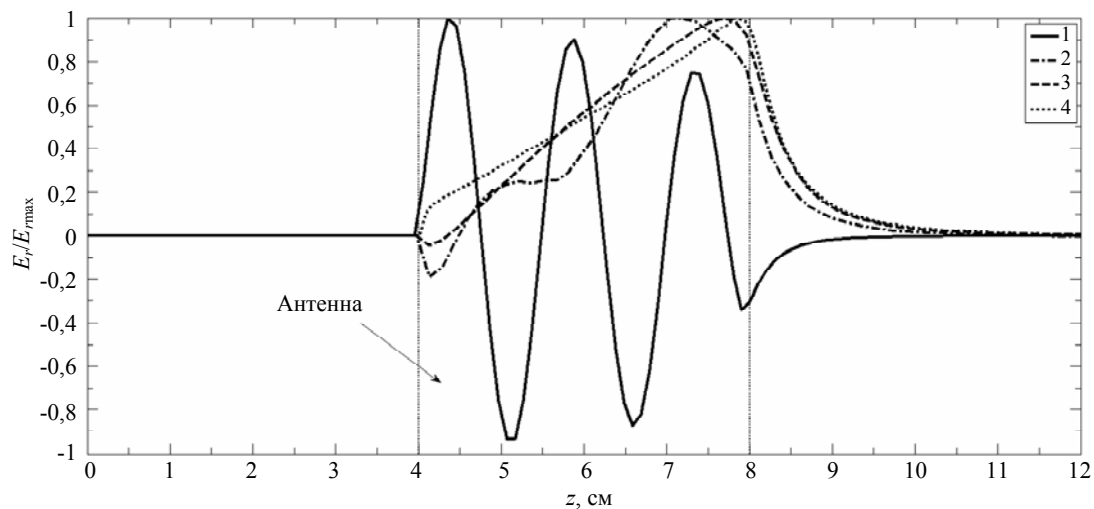


Рис. 2. Распределения составляющей E_r электрического поля по z : 1—3 — плазменная антенна с параметрами из таблицы 1; 4 — металлическая антенна

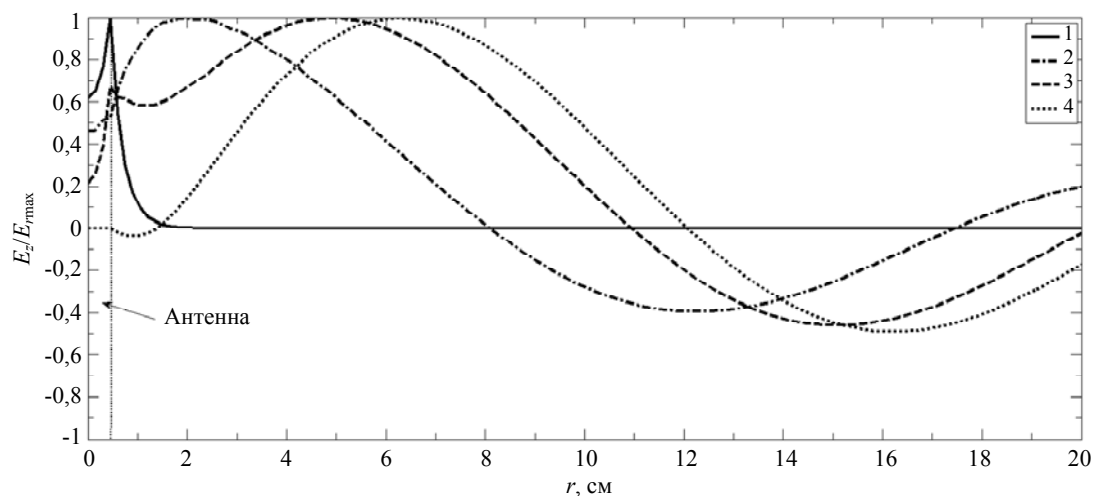


Рис. 3. Распределения составляющей E_z электрического поля по r : кривые 1—3 — плазменная антенна с параметрами из таблицы 1; 4 — металлическая антенна

На рис. 3 для этих же значений концентрации плазмы представлены структуры поля $E_z(r)$. Здесь также наглядно видно три качественно различных режима работы плазменной антенны. В первом режиме (кривая 1) можно наблюдать как $E_z(r)$ затухает в обе стороны от границы плазмодиеlectric с различной скоростью, при этом в вакууме она затухает на расстоянии $a = 1$ см, что много меньше длины волны подаваемой на антенну $\lambda_0 \approx 18$ см. Это говорит о том, что когда $\omega_p = \sqrt{2} \cdot 2\pi f_0$, антенна работает как линия поверхностной волны без излучения в окружающее пространство.

Переходной режим характеризуется наличием в распределении $E_z(r)$ (кривая 2) как составляющей поверхностной волны, так и составляющей излучаемой объемной волны. Поверхностная часть волны медленно затухает вглубь плазмы, а излучаемая объемная волна для случая $\omega_p = 5 \cdot 2\pi f_0$ отличается по фазе более чем на 60° от излучения металлической антенны (кривая 4).

В третьем режиме при (кривая 2) $E_z(r)$ состоит из поверхностной и объемной части волны, но при этом поверхностная волна быстро затухает в плазме, а объемная часть отличается от случая МНВ (кривая 4) лишь на 20° по фазе. Разница в фазе $E_z(r)$ для реальных ПНВ и МНВ из неидеальных проводников может быть меньше в связи с конечностью скин-слоя.

Для рассматриваемых случаев ПНВ и МНВ были построены также диаграммы направленности (рис. 4). Для плазменной антенны (кривые 1–3) ДН по амплитуде поля нормированы на ДН металлической антенны (кривая 4) и построены в пря-

моугольной системе координат для значений θ , взятых от 0 до 90° (0° совпадает с осью антенны).

Как видно из представленных диаграмм, в случае $n_e = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ кривая 1 близка к 0, т. е. при $\omega_p = \sqrt{2} \cdot 2\pi f_0$, как уже отмечалось выше, антенна не излучает энергию волны. В переходном режиме (кривая 2) $n_e = 9,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $\omega_p = 5 \cdot 2\pi f_0$ ДН меньше по амплитуде, чем ДН металлической антенны, что говорит о не совсем оптимальной работе антенны в по сравнению с МНВ. ДН для режима излучения $n_e = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $\omega_p = 10 \cdot 2\pi f_0$ кривая 3 очень близка к кривой 4, из чего следует, что при $\omega_p \geq 10 \cdot 2\pi f_0$ плазменная антенна по характеристикам близка металлической.

Заключение

По результатам численного моделирования видны качественно разные режимы работы плазменной антенны при изменении параметров плазмы. Показаны три разных режима работы плазменной антенны при изменении концентрации плазмы n_e (частота столкновений электронов оставалась постоянной $\nu_e = 10^7 \text{ с}^{-1}$) и частоте внешнего импульса $f_0 = 1,7 \text{ ГГц}$. В режиме излучения характеристики плазменной антенны в целом не хуже, чем характеристики металлической антенны.

Измерения диаграмм направленности были проведены в безэховой камере отдела 21 ОАО «НИИ «Кулон». Авторы благодарны руководству ОАО «НИИ «Кулон» и сотрудникам отдела 21 ОАО «НИИ «Кулон» за предоставленную помощь.

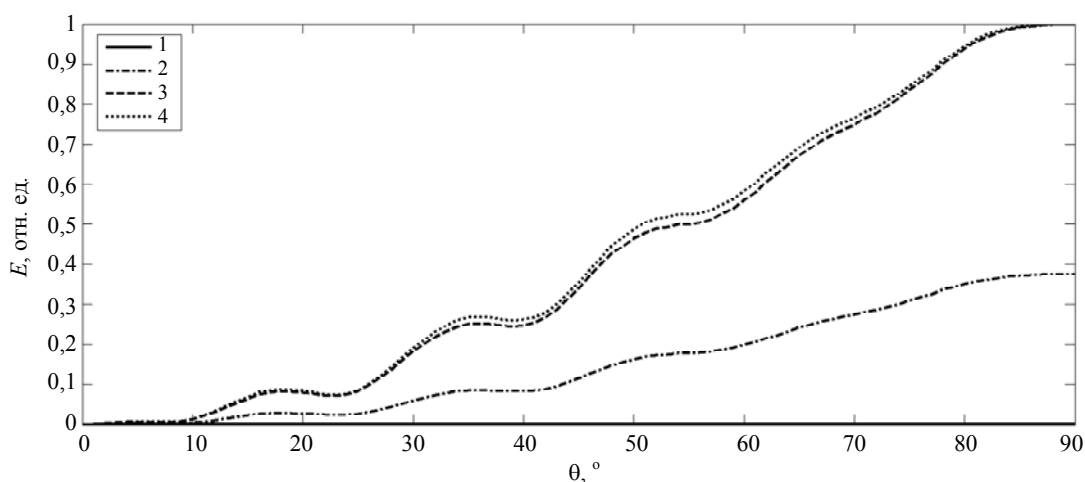


Рис. 4. Диаграммы направленности антенн: кривые 1–3 — плазменная антенна с параметрами из таблицы 1; 4 — металлическая антенна

Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ, проект № 14-08-31336.

Литература

1. Borg G. G., Harris J. H., Miljak D. G., Martin N. M. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. No. 22. P. 3272.
2. Rayner J. P., Whichello A. P., Cheetham A. D. // IEEE Trans. on Plasma Science 2004. V. 32. No. 1. P. 269.
3. Alexeff I., Anderson T., Parameswaran S., Pradeep E. P., et al. // IEEE Trans. on plasma science 2006. V. 34. No. 2. P. 166.
4. Истомин Е. Н., Карфидов Д. М., Минаев И. М., Сергейчев К. Ф. и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 4. С. 423.
5. Liang C., Xu Y., Wang Z. // Chin. Phys. Lett. 2008. V. 25. No. 10. P. 3712.
6. Chen Z., Zhu A., Lu J. // WSEAS Trans. on Com. 2013. V. 12. No. 2. P. 63.
7. Bogachev N. N., Bogdankevich I. L., Gusein-zade N. G., Tarakanov V. P. // Acta Polytechnica 2013. V. 53. No. 2. P. 110.
8. Тараканов В. П. Универсальный электромагнитный код КАРАТ. В кн. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. — М.: Наука, 2003. С. 456—476.
9. Богачев Н. Н., Богданкевич И. Л., Гусейн-заде Н. Г. Моделирование радиофизических процессов. Часть 2: Учебное пособие. — М.: МГТУ МИРЭА, 2013.
10. Богачев Н. Н., Сергейчев К. Ф. // Журнал радиоэлектроники (в публикации).
11. Айзенберг Г. З. Антенны ультракоротких волн. — М.: Связьиздат, 1957.

Simulation of plasma antenna operation modes

N. N. Bogachev^{1,2}, I. L. Bogdankevich^{1,2} and N. G. Gusein-zade^{1,2}

¹Moscow State Technical University of Radioengineering, Electronics and Automatics
78 Vernandsky av., Moscow, 119454, Russia
E-mail: bgniknik@yandex.ru

²Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
38 Vavilov Street, Moscow, 119991, Russia

Received August 16, 2014

Numerical simulation studied features and modes of plasma monopole antenna of finite length and diameter at the signal frequency $f_0 = 1.7$ GHz. A plasma density varied within two orders of magnitude, the calculation results were compared with a similar metal antenna. The distributions of the electric fields in the near field antenna and radiation pattern have been obtained. A pattern of the metal monopole from the measurement and simulation results in the two programs have been also presented.

PACS: 52.40.Fd

Keywords: plasma antenna, numerical simulation, surface electromagnetic wave, metal monopole, radiation pattern.

References

1. G. G. Borg, J. H. Harris, D. G. Miljak, et al., Appl. Phys. Lett. **74**, 3272 (1999).
2. J. P. Rayner, A. P. Whichello, and A. D. Cheetham, IEEE Trans. on Plasma Science **32**, 269 (2004).
3. I. Alexeff, T. Anderson, S., Parameswaran, et al., IEEE Trans. on Plasma Science **34**, 166 (2006).
4. E. N. Istomin, D. M. Karfidov, I. M. Minaev, et al., Plasma Physics Reports **32**, 388 (2006).
5. C. Liang, Y. Xu, and Z. Wang, Chin. Phys. Lett. **25**, 3712 (2008).
6. Z. Chen, A. Zhu, and J. Lu, WSEAS Trans. on Com. **12** (2), 63 (2013).
7. N. N. Bogachev, I. L. Bogdankevich, N. G. Gusein-zade, et al., Acta Polytechnica **53**, 110 (2013).
8. V. P. Tarakanov, *User's Manual for Code KARAT* (Springfield, 1992, VA).
9. N. N. Bogachev, I. L. Bogdankevich, and N. G. Gusein-zade, *Simulation of Radio Engineering Processes* (MSTU MIREA, Moscow: 2013) [in Russian].
10. N. N. Bogachev and K. F. Sergeichev, Journal of Radio Electronics (in published).
11. G. Z. Aizenberg, Antennas of Ultra-Short Waves (Svyaz'izdat, Moscow, 1957) [in Russian].