

В. М. Балашов¹, И. А. Бузинов¹, А. О. Смирнов²¹ АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»», Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ СВЧ-ДАТЧИКОВ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ АНТЕННЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ

Рассмотрены особенности организации радиоволнового контроля антенных обтекателей. Сформулированы требования к допустимым погрешностям измерительной схемы амплифазометра и собственно СВЧ-датчиков. Отмечены особенности применения диэлектрических стержневых антенн в качестве СВЧ-датчиков для контактного радиоволнового контроля антенных обтекателей. Выбор диэлектрических антенн основан на требованиях локальности зоны контроля с учетом кривизны обтекателя, неоднородности геометрической толщины стенки, одностороннего доступа к объекту контроля. Выполнена оценка погрешностей измерений модуля и фазы комплексных коэффициентов отражения и прохождения, связанных с неравномерностью распределения электромагнитного поля в апертуре датчика. Предложена оценка пригодности СВЧ-датчиков по уровню бокового излучения диаграммы направленности в дальней зоне. Сформулированы требования к СВЧ-датчикам, используемым в автоматизированных стендах контактного радиоволнового контроля антенных обтекателей.

Ключевые слова: диэлектрическая стержневая антенна, радиоволновой контроль, антенный обтекатель, неравномерность распределения поля.

Для цитирования: Балашов В. М., Бузинов И. А., Смирнов А. О. Оценка погрешностей СВЧ-датчиков радиоволнового контроля антенных обтекателей // Радиопромышленность. 2017. № 4. С. 80–84.

V. M. Balashov¹, I. A. Buzinov¹, A. O. Smirnov²¹ Research and Production Enterprise Radar mms, Saint-Petersburg, Russia, ² Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

ESTIMATION OF ERRORS IN MICROWAVE SENSORS FOR ANTENNA RADOME RADIO WAVE CONTROL

Particular features in organization of radio wave control of antenna radome were considered. Requirements were formulated for the permissible errors in the measuring circuit of ampliphase meter and the microwave sensors themselves. Application features of dielectric rod antennas as microwave sensors for contact radio wave control of antenna fairings were considered. Choice of dielectric antennas is based on the requirements of the locality of the control zone, taking into account the curvature of the radome, the inhomogeneity of the geometric wall thickness, unilateral access to the monitored object. The errors in the measurements of the module and the phase of complex reflection/transmission coefficients related with nonuniform distribution of the electromagnetic field in the sensor aperture were estimated. An estimate was proposed concerning suitability of microwave sensors by the level of lateral radiation in the far-field radiation pattern. Requirements were formulated for microwave sensors used in automated stands for contact radio wave control of antenna radome.

Keywords: dielectric rod antenna, radio wave control, antenna fairing, nonuniform field distribution.

For citation: Balashov V. M., Buzinov I. A., Smirnov A. O. Estimation of errors in microwave sensors for antenna radome radio wave control. Radiopromyshlennost, 2017, no. 4, pp. 80–84 (In Russian).

Для радиоволнового контроля антенных обтекателей используют методы дальней зоны, предусматривающие измерение изменений диаграммы направленности антенны под влиянием обтекателя, и методы ближней зоны (контактные), позволяющие определять неоднородность электрических и геометрических параметров стенок обтекателей.

Стенды радиоволнового контроля геометрических и электрофизических параметров стенок антенных обтекателей включают СВЧ-амплифазометр и собственно СВЧ-датчик, непосредственно контактирующий с контролируемым обтекателем.

Погрешности измерения амплитудных и фазовых характеристик элементов СВЧ-тракта составляют 0,2–0,5% и 0,1°–0,5° соответственно, что составляет 20–40% от допустимой погрешности измерения электрической толщины стенки обтекателя 1,0–2,5% [1].

Погрешность СВЧ датчиков при контактном контроле составляет 0,5°–2,0° и соответствует 60–80% от допустимого значения погрешности измерения электрической толщины. Рядом авторов рассмотрено влияние на результаты контроля обтекателей таких источников погрешностей, как рассогласование СВЧ-датчиков и стенки обтекателя, погрешность взаимного расположения СВЧ-датчика и антенного обтекателя и т.п.

При этом недостаточно исследованы погрешности СВЧ-датчика, вызванные взаимодействием электромагнитной волны (ЭМВ) с плоским срезом, т.е. кромкой изделия и возбуждением в стенке обтекателя поверхностной волны.

Повышение достоверности радиоволновых антенных обтекателей требует разработки, экспериментального исследования и внедрения новых конструкторско-технологических реализаций СВЧ-датчиков. СВЧ-датчики должны обеспечить погрешности измерений не более 0,2–0,5% и 0,1°–0,5° для амплитудных и фазовых характеристик соответственно. При этом поперечный размер зоны контроля не должен превышать 1,5–2,0 λ_0 .

При проектировании СВЧ-датчиков необходим учет особенностей размеров, формы обтекателей, изменения кривизны, разнотолщинности стенок, ограниченного объема внутренней полости, возможный односторонний доступ и т.п.

Для базового варианта конструкции СВЧ-датчиков предложена диэлектрическая стержневая антенна (ДСА), которая за счет концентрации поля в диэлектрическом излучателе и области пространства, примыкающей к излучателю, обеспечивает необходимую локальность измерений.

Рассмотрим влияние взаимодействия падающей ЭМВ с кромкой обтекателя на результаты измерения радиотехнических характеристик его стенки [1].

Непосредственно контролируемыми величинами в данном случае являются модуль и фаза

коэффициента отражения стенки обтекателя (рис. 1).

Экспериментальные данные подтверждают наличие неоднородности амплитудного распределения в ближней зоне излучения ДСА, достигающей 12–15 дБ относительно максимального значения поля. Такая неоднородность вызвана излучением кромки металлического волновода (МВ), возбуждающего ДСА.

Для определения интенсивности возбуждения кромки МВ проведены исследования СВЧ-датчиков X-диапазона. В ходе эксперимента механизм сканирования перемещал зонд вдоль оси ДСА на расстоянии 10 мм от излучателя. Сигнал после детектирования фиксировался в регистрирующем устройстве, на второй канал которого поступали масштабирующие метки с шагом 10 мм.

Результаты эксперимента подтверждают наличие локального максимума вблизи кромки металлического волновода (рис. 2, кривые 1, 2).

Причиной возникновения этого максимума является скачкообразное изменение условий распространения ЭМВ при переходе ее из МВ, заполненного диэлектриком, в излучатель ДСА.

Изменение конструкции ДСА, заключающееся в исполнении МВ в виде открытого конца волновода с изрезанной кромкой при глубине вырезов 0,8–2 λ_0 , привело к незначительному уменьшению максимума поля при расширении области максимума вдоль излучателя ДСА (рис. 2, кривые 3, 4).

Для оценки погрешности измерения параметров стенки обтекателя, обусловленной

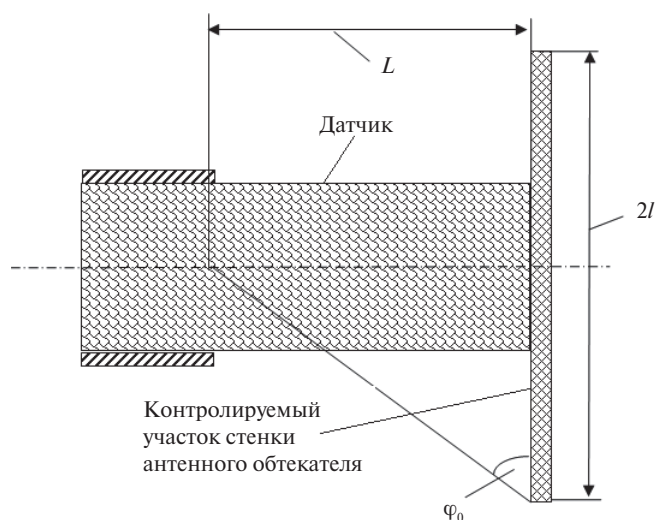


Рисунок 1. Взаимное расположение СВЧ-датчика и контролируемого участка стенки антенного обтекателя: L – расстояние от фазового центра ДСА по зоны контроля; φ_0 – угол между осью ДСА и направлением на кромку обтекателя; $2l$ – размер зоны контроля

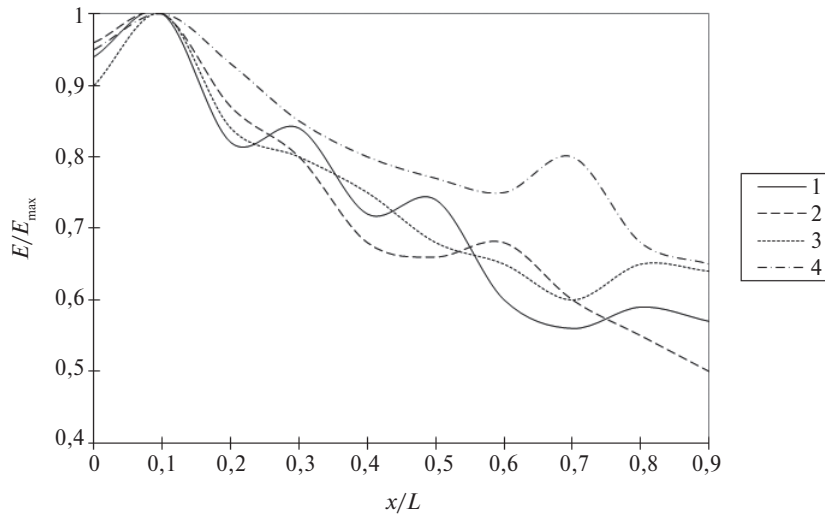


Рисунок 2. Распределение интенсивности поля вдоль оси ДСА (положение кромки волновода $x = 0$): 1 – конический излучатель, кромка волновода без вырезов; 2 – цилиндрический излучатель, кромка волновода без вырезов; 3 – конический излучатель, глубина вырезов в кромке – $0,3 \lambda_0$; 4 – цилиндрический излучатель, глубина вырезов в кромке волновода – $0,4 \lambda_0$

взаимодействием падающей ЭМВ с кромкой АО, результирующее отраженное поле $U_{рез}$ представим в виде суммы поля $U_{отр}$, отраженного от плоской стенки, параметры t и ε которой равны параметрам стенки АО, и дополнительного поля $U_{доп}$, представляющего собой поправку на краевые эффекты взаимодействия поля падающей ЭМВ с кромкой контролируемого обтекателя, т.е.

$$U_{рез} = U_{отр} + U_{доп}. \quad (1)$$

Для поля $U_{отр}$, пренебрегая собственными потерями в излучателе ДСА, запишем [2]

$$U_{отр} = |R|U_0 \exp[j(2kL + \psi)], \quad (2)$$

где $|R|$, ψ – модуль и фаза коэффициента отражения диэлектрической стенки с неограниченными поперечными размерами; U_0 – амплитуда падающей ЭМВ.

Положим, что падающая ЭМВ имеет единичную амплитуду: $U_0 = 1$.

Для дополнительного поля $U_{доп}$ согласно геометрической теории дифракции справедливо [3]

$$U_{доп} = \gamma D(\varphi, \varphi_0) / \sqrt{r \exp(jkr)}, \quad (3)$$

где r , φ – полярные координаты фазового центра ДСА:

$$r = \sqrt{L^2 + l^2}; \varphi = \varphi_0 = \arctg(L/l), \quad (4)$$

где φ_0 – угол падения ЭМВ на кромку обтекателя; k – волновое число: $k = 2\pi/\lambda$; $D(\varphi, \varphi_0)$ – коэффициент интенсивности поля $U_{доп}$, при единичной амплитуде падающей волны, равной амплитуде дополнительно поля в фазовом центре ДСА; γ – коэффициент

неравномерности амплитудного распределения поля ДСА в плоскости расположения стенки обтекателя.

Коэффициент интенсивности $D(\varphi, \varphi_0)$ определим по модельной задаче, представленной в [3]:

$$D(\varphi, \varphi_0) = -\frac{\exp(j\pi/4)}{2\sqrt{2\pi k}} \left[\frac{1}{\cos(\varphi + \varphi_0)/2} + \frac{1}{\cos(\varphi - \varphi_0)/2} \right]. \quad (5)$$

С учетом геометрии решаемой задачи коэффициент интенсивности $D(\varphi, \varphi_0)$ поля $U_{доп}$ примет вид

$$D(\varphi, \varphi_0) = -\frac{\exp(j\pi/4)}{2\sqrt{2\pi k}} \left(1 + \frac{1}{\cos \varphi_0} \right). \quad (6)$$

Для результирующего поля $U_{рез}$ справедливо

$$U_{рез} = U_{отр}(1 + U_{доп} / U_{отр}). \quad (7)$$

Максимальная ошибка в измерении фазы коэффициента отражения достигается при ортогональности векторов $U_{отр}$ и $U_{доп}$:

$$\Delta\psi_{max} = \pm \arctg \frac{\gamma \sqrt{(\lambda/l)[1 + 1/\cos(\arctg L/l)]}}{|R| \times 2\pi [1 + (L/l)^2]^{0,25}}. \quad (8)$$

При малой амплитуде дополнительного поля $U_{доп}$ максимальная ошибка измерения фазы коэффициента отражения равна

$$\Delta\psi_{max} = \pm \frac{\gamma \sqrt{(\lambda/l)[1 + 1/\cos(\arctg L/l)]}}{|R| \times 2\pi [1 + (L/l)^2]^{0,25}}. \quad (9)$$

Максимальная ошибка измерения модуля коэффициента отражения достигается при параллельности векторов $U_{отр}$ и $U_{доп}$:

$$\left| \frac{\Delta R}{R} \right|_{\max} = \pm \frac{100\gamma\sqrt{(\lambda/l)[1+\cos(\operatorname{arctg} L/l)]}}{|R|\times 2\pi[1+(L/l)^2]^{0,25}}. \quad (10)$$

Результаты расчета погрешностей измерения модуля и фазы коэффициента отражения, вызванных взаимодействием поля падающей ЭМВ с кромкой обтекателя, приведены на рис. 3а и 3б соответственно. Результаты расчета получены для типовых значений отношения геометрических размеров ДСА и контролируемого обтекателя L/l , λ/l а также величины модуля коэффициента отражения диэлектрической стенки $|R|$.

Эти погрешности возрастают при уменьшении модуля коэффициента отражения, что соответствует полуволновым обтекателям, обладающим максимальной радиопрозрачностью.

Полученные результаты распространяются и на контроль комплексного коэффициента прохождения. Опуская промежуточные выкладки для результирующего поля $U_{\text{рез}}$, при использовании двух идентичных ДСА получим

$$U_{\text{рез}} = |T| \exp[j(2kL + \psi_T)] + D(\varphi, \varphi_0) \exp(jkr) / \sqrt{r}, \quad (11)$$

где $|T|$, ψ_T – модуль и фаза коэффициента прохождения для диэлектрической стенки с неограниченными поперечными размерами.

При использовании ДСА, отличающихся формой и размерами диэлектрических излучателей, для расчета коэффициента интенсивности $D(\varphi, \varphi_0)$ поля $U_{\text{доп}}$ применимо выражение (5), в котором координаты фазового центра второго СВЧ-датчика определяются следующим образом:

$$r = \sqrt{L_2^2 + l^2}, \quad \varphi = \operatorname{arctg}(L_2/l), \quad (12)$$

где L_2 – расстояние от диэлектрической стенки обтекателя до фазового центра второго СВЧ-датчика.

Практические значения коэффициента неравномерности амплитудного распределения поля ДСА составляют 12–16 дБ, что вызывает ошибки измерения фазы и модуля коэффициента отражения соответственно 0,2°–1,4° и 1,7–2,5%.

ДСА характеризуются диаграммой направленности их излучения в дальней зоне, причем используемый для ее описания уровень бокового излучения непосредственно определяется введенным коэффициентом неравномерности амплитудного распределения γ [4].

Заключение

В процессе работы была проведена оценка погрешности измерений параметров стенок антенных обтекателей с использованием СВЧ-датчиков. На основании результатов проведенных экспериментов можно сделать выводы, что:

- пригодность ДСА для целей радиоволнового контроля геометрических и электрофизических параметров стенок антенных обтекателей можно оценивать по уровню их излучения в дальней зоне;
- снижение погрешности измерения геометрических и электрофизических параметров стенок обтекателей, обусловленное взаимодействием поля падающей ЭМВ с кромкой обтекателя, возможно при использовании ДСА, имеющих пониженный уровень их бокового излучения в дальней зоне.

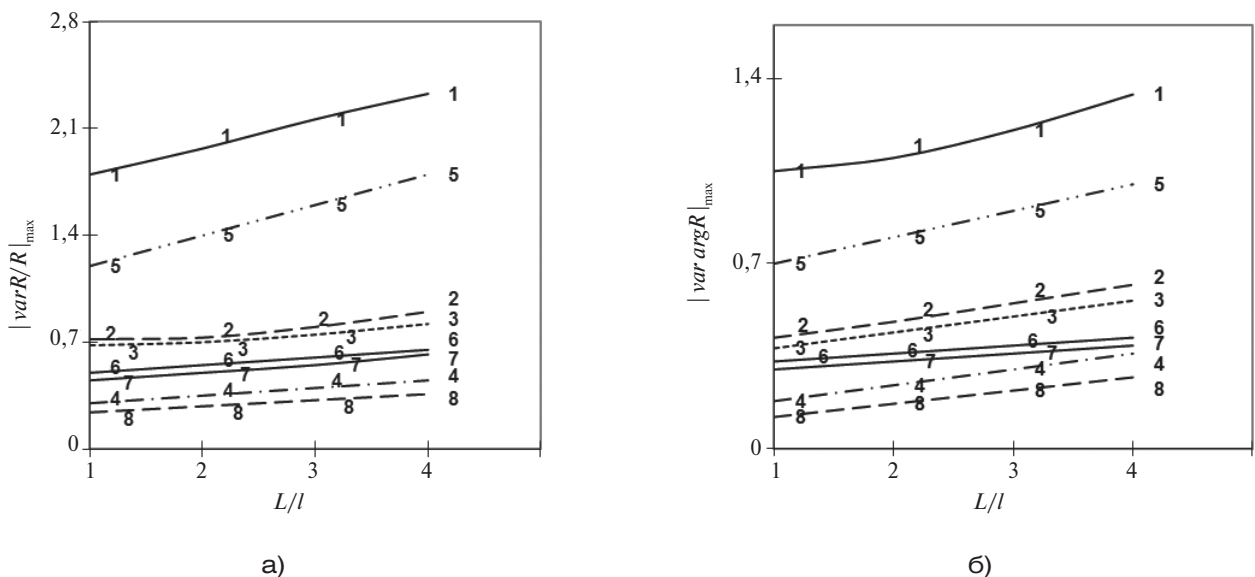


Рисунок 3. Максимальная погрешность измерения фазы (а) и модуля (б) коэффициента отражения при амплитудной неравномерности в апертуре ДСА –12 дБ (1, 3, 5, 7) и –16 дБ (2, 4, 6, 8): 1, 2, 5, 6 – $|R|^2 = 0,05$; 3, 4, 7, 8 – $|R|^2 = 0,15$; 1, 2, 3, 4 – $\lambda/l = 0,2$; 5, 6, 7, 8 – $\lambda/l = 0,1$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шингареев Р. Р. Диэлектрическая стержневая антенна в качестве СВЧ-датчика параметров антенных обтекателей // Международный межвузовский сборник научных трудов «Технические средства судовождения и связи на морских и внутренних водных путях». СПб.: Судостроение, 2006. Вып. 7. С. 149–157.
2. Балашов В. М. Заводов Л. В., Шингареев Р. Р. СВЧ-датчики для экспресс-контроля параметров материалов // Вопросы радиоэлектроники. 2007. Вып. 3. С. 147–153.
3. Боровиков В. А., Кинбер Б. Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978. 247 с.
4. Взятых В. Ф. Диэлектрические волноводы. М.: Советское радио, 1970. 243 с.

REFERENCES

1. Shingareev R. R. Dielectric rod antenna as a microwave sensor for the parameters of antenna fairings. *Mezhdunarodny mezhvuzovskiy sbornik nauchnyh trudov «Tehnicheskie sredstva sudovozhdeniya i svyazi na morskikh i vnutrennih vodnyh putyakh»*. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2006, iss. 7, pp. 149–157.
2. Balashov V. M. Zavodov L. V., Shingareev R. R. Microwave sensors for express control of materials' parameters. *Voprosy radioelektroniki*, 2007, iss. 3, pp. 147–153.
3. Borovikov V. A., Kinber B. E. *Geometricheskaja teorija difrakcii* [Geometric theory of diffraction]. Moscow, Svyaz Publ., 1978, 247 p.
4. Vzyatyshv V. F. *Dijelektricheskie volnovody* [Dielectric waveguides]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 243 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Балашов Виктор Михайлович, д.т.н., профессор, зам. генерального конструктора, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, e-mail: balashov_vm@radar-mms.com.

Бузинов Илья Александрович, начальник бюро, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, e-mail: businov_ia@radar-mms.com.

Смирнов Александр Олегович, д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой высшей математики и механики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, e-mail: alsmir@guap.ru.

AUTHORS

Balashov Viktor, Dr., professor, deputy general designer, JSC Research and Production Enterprise Radar mms, 37A, Novoselkovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, e-mail: balashov_vm@radar-mms.com.

Buzinov Ilya, chief of the bureau, JSC Research and Production Enterprise Radar mms, 37A, Novoselkovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, e-mail: businov_ia@radar-mms.com.

Smirnov Aleksandr, Dr., associate professor, head of Department of Higher Mathematics and Mechanics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, e-mail: alsmir@guap.ru.