

УДК 621.396:621.6

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННО-ВОЛНОВОДНЫХ ТРАКТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ**Гурский С.М.***Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург,
e-mail: sergeygurskiy2018@yandex.ru*

Повышение объема и уровня требований к радиолокационным системам (РЛС), особенно в части обеспечения защищенности от влияния поражающих факторов оружия, ставит перед разработчиками ряд принципиально новых научно-технических задач. К их числу относятся задачи количественной оценки на этапе проектирования стойкости к внешним воздействиям функциональных элементов, устройств и РЛС в целом. Анализ известных работ свидетельствует о том, что для данных условий построение математических моделей антенно-волноводных трактов РЛС не проводилось. Цель статьи состоит в разработке математических моделей и алгоритмов количественного оценивания изменений радиотехнических параметров антенно-волноводных трактов при повреждении равномерно изогнутых волноводов поражающими факторами оружия. В статье исследуются два основных типа повреждений – пробойны и вмятины. Моделирование повреждений антенно-волноводных трактов проводилось в рамках экспериментально-теоретического метода на имитационной модели. Суть данного метода заключается в определении следующих величин: математического ожидания числа повреждений, их вида, места появления, размеров; радиотехнических параметров антенно-волноводных трактов с повреждениями; степени ухудшения тактико-технических характеристик РЛС за счет полученных элементами антенно-волноводных трактов повреждений. Разработанные математические модели волноводов отличаются от известных дополнительным учетом потерь на излучение из возникающих пробойн и потерь на отражение от пробойн и вмятин. Указанные математические модели являются достаточно эффективными и точными, а их применение целесообразно на этапе проектирования антенно-волноводных трактов перспективных РЛС. Предложенные автором технические решения адаптивных антенно-волноводных трактов РЛС могут позволить повысить отношение сигнал/шум по сравнению с известными в условиях осколочно-пулевого воздействия.

Ключевые слова: радиолокационная система, антенно-волноводный тракт, отношение сигнал / шум, математическая модель

MATHEMATICAL MODELS OF ELEMENTS OF THE ANTENNA / WAVEGUIDE PATHS OF RADAR SYSTEMS WITH DAMAGE**Gurskiy S.M.***Military Space academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, e-mail: sergeygurskiy2018@yandex.ru*

Increasing the volume and level of requirements for radar systems, especially in terms of ensuring protection from the influence of damaging factors of weapons, puts before the developers a number of fundamentally new scientific and technical tasks. Among them are the tasks of quantitative assessment at the design stage of resistance to external influences of functional elements, devices and radar as a whole. The analysis of the known works shows that for these conditions the construction of mathematical models of antenna-waveguide paths of the radar was not carried out. The purpose of the article is to develop mathematical models and algorithms for quantitative evaluation of measurements of radio-technical parameters of antenna-waveguide paths in case of damage of uniformly curved waveguides by striking factors of weapons. The article examines two main types of damage-holes and dents. The simulation of antenna-waveguide path damage was carried out in the framework of the experimental-theoretical method on the simulation model. The essence of this method is to determine the following values: – mathematical expectation of the number of damages, their type, place of appearance, size; radio technical parameters of antenna-waveguide paths with damages; the degree of deterioration of the tactical and technical characteristics of the radar due to the elements of antenna-waveguide damage paths. The developed mathematical models of waveguides differ from the known additional accounting for radiation losses from the resulting holes and reflection losses from holes and dents. These mathematical models are quite effective and accurate, and their application is advisable at the design stage of antenna-waveguide paths of advanced radar. The technical solutions of adaptive antenna-waveguide paths of radar proposed by the author can allow to increase the SNR in comparison with the known ones in the conditions of fragmentation-bullet impact.

Keywords: radar system, antenna-waveguide path, signal-to-noise ratio, mathematical model

Повышение объема и уровня требований к радиолокационным системам (РЛС), особенно в части обеспечения защищенности от влияния поражающих факторов оружия, ставит перед разработчиками ряд принципиально новых научно-технических задач. К их числу относятся задачи количественной оценки на этапе проектирования стойкости к внешним воздействиям функциональных элементов, устройств и РЛС в целом. Анализ известных работ свидетельствует о том, что для данных условий

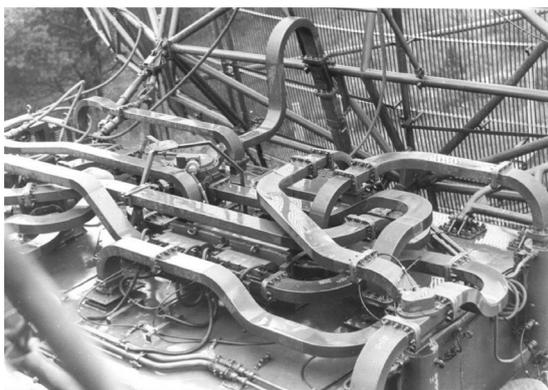
построение математических моделей антенно-волноводных трактов (АВТ) РЛС не проводилось [1–3].

Практическая необходимость разработки указанных моделей определяется тем, что АВТ ряда РЛС содержат большое число равномерно изогнутых волноводов в E - и H -плоскостях (рисунок, таблица). В частности, в типовых РЛС отношение $\frac{S_{\text{РИВ}}}{S_{\text{АВТ}}}$ уязвимой площади равномерно изогнутых волноводов $S_{\text{РИВ}}$ к уязвимой площади АВТ

в целом $S_{\text{АВТ}}$ составляет 11–40%. В силу этого вероятность осколочного поражения равномерно изогнутых волноводов становится сравнимой с вероятностью поражения регулярных элементов и всего АВТ в целом.

Цель статьи состоит в разработке математических моделей и алгоритмов количественного оценивания изменений радиотехнических параметров АВТ при повреждении равномерно изогнутых волноводов поражающими факторами оружия. В статье исследуются два основных типа повреждений – пробоины и вмятины. Моделирование повреждений АВТ проводилось в рамках экспериментально-теоретического метода на имитационной модели. Суть данного метода заключается в определении следующих величин:

- математического ожидания числа повреждений, их вида, места появления, размеров;
- радиотехнических параметров антенно-волноводных трактов с повреждениями;
- степени ухудшения тактико-технических характеристик РЛС за счет полученных элементами АВТ повреждений.



Внешний вид антенно-волноводного тракта РЛС 5Н87

Данные по равномерно изогнутым волноводам в типовых РЛС

Типы РЛС	Количество равномерно изогнутых волноводов	$\frac{S_{\text{РЛС}}}{S_{\text{АВТ}}}, \%$
5Н87	134	40
5Н69	134	30
П-37	45	25
П-40	27	25
ПРВ-16	21	20
ПРВ-17	12	20
ПРВ-9	11	15
ПРВ-13	6	11

Материалы и методы исследования

Для оценивания изменений тактико-технических характеристик РЛС за счет повреждений АВТ принят обобщенный показатель эффективности, в качестве которого было выбрано отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе согласованного фильтра. Для количественной оценки влияния повреждений элементов АВТ на его радиотехнические параметры получен частный показатель эффективности, в качестве которого был выбран коэффициент полезного действия (КПД) АВТ $K_{\text{АВТ}}$, который отличается от известных дополнительных учетом потерь на излучение из возникающих пробоин:

$$K_{\text{АВТ}} = \tilde{P}_{\text{изл}} \left(1 - |\Gamma_{\text{повр}}|^2\right) \times \left[1 - \left(P_{\text{изл}} \times |\Gamma_{\text{повр}}|^2\right)\right]^{-1}, \quad (1)$$

где $\tilde{P}_{\text{изл}} = \exp(-2 \times \alpha_{\text{повр}} \times l_{\text{повр}}) - P_{\text{изл}}$;
 $P_{\text{изл}}$ – мощность излучения из пробоин;
 $|\Gamma_{\text{повр}}|$ – модуль комплексного коэффициента отражения в АВТ с повреждениями;
 $\alpha_{\text{повр}}$ – численное значение коэффициента затухания, обусловленного конечной проводимостью стенок АВТ с повреждениями;
 $l_{\text{повр}}$ – длина частично поврежденных АВТ.

Для оценивания влияния повреждений разработаны соответствующие математические модели. При этом построение моделей проведено при следующих допущениях:

- рассмотрены только такие электромагнитные поля, для которых уравнения Максвелла могут быть сведены к волновому уравнению Гельмгольца;
- заполняющая волновод среда однородна, изотропна и без потерь, а стенки волновода обладают идеальной проводимостью;
- размеры широкой и узкой стенок поперечного сечения волновода выбраны такими, что распространяющейся является лишь одна основная волна [4, 5].

Указанные допущения позволили представить АВТ с повреждениями каскадным соединением четырехполюсников, каждый из которых описывает соответствующий регулярный и нерегулярный элементы АВТ с повреждениями. При этом показано, что разработка математических моделей нерегулярных элементов с повреждениями сводится к определению элементов соответствующей волновой матрицы передачи:

$$[T] = \prod_{k=1}^N [T_k] \times [T_{\text{поврк}}] \times [T_k], \quad (2)$$

где $[T_k]$ и $[T_{\text{поврк}}]$ – матрицы передачи соответственно k -го неповрежденного и поврежденного участков элемента АВТ; N – число повреждений.

В основу построения математических моделей равномерно изогнутых волноводов с вмятинами и пробоинами положено совместное применение метода эквивалентных схем сверхвысоких частот (СВЧ) и вариационных методов в электродинамике. При построении моделей обоснована возможность принятия допущения о том, что максимальные размеры вмятин $R_{\text{вм}}$ и пробоин $R_{\text{проб}}$ много меньше рабочей длины волны $\lambda_{\text{проб}}$ современных РЛС ($R_{\text{вм}}, R_{\text{проб}} \ll \lambda$). Обоснование данного допущения позволило использовать для построения искомых электродинамических моделей методы теории дифракции электромагнитных волн на малых телах и апертурах. Определение параметров математических моделей нерегулярных элементов с повреждениями проведено на основе решения соответствующих граничных задач для уравнений Максвелла в квазистатическом приближении.

Математическая модель равномерно изогнутого волновода с пробоиной

Равномерно изогнутый волновод с пробоиной был представлен каскадным соеди-

нением двух четырехполюсников с эквивалентной схемой в виде шунта из активного сопротивления и одним реактивным четырехполюсником с Т-образной эквивалентной схемой. Причем реактивный четырехполюсник учитывает потери на отражение электромагнитной энергии, а остальные два – потери на излучение электромагнитной энергии через пробоину в пространство. Параметры эквивалентных схем этих четырехполюсников определены при решении вариационными методами интегральных уравнений с учетом граничных условий непрерывности на апертуре пробоины нормальной составляющей электрического поля и скалярного магнитостатического потенциала. Задача определения $[T_{\text{поврк}}]$ для модели (2) в случае пробоины на широкой стенке равномерно изогнутого волновода сведена к определению коэффициента отражения от пробоины $\Gamma_{\text{проб}}$ и отношения $N_{\text{проб}} = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{пад}}}$, где $P_{\text{пад}}$ и $P_{\text{изл}}$ – уровни мощности, распространяющейся в волноводе, и мощности, излученной через пробоину:

$$\Gamma_{\text{проб}} = -j \times \frac{2 \times \pi \times \sqrt{1-\lambda^2}}{\lambda \times a \times b} \times \left[\frac{\tilde{\lambda}^2 \times M_{zz}}{1-\tilde{\lambda}^2} \times \cos^2 \tilde{x}_0 - M_{xx} \times \sin^2 \tilde{x}_0 + \frac{P_{yy}}{1-\tilde{\lambda}^2} \times \sin^2 \tilde{x}_0 \right], \quad (3)$$

$$N_{\text{проб}} = \frac{32 \times \pi^3 \times \sin^2 \tilde{x}_0}{3 \times a \times b \times \lambda^4 \times \sqrt{1-\lambda^2}} \times \left[M_{xx} \times (1-\lambda^2) + \frac{M_{zz} \times \tilde{\lambda}^4}{1-\tilde{\lambda}^2} \times \text{ctg}^2 \tilde{x}_0 + P_{yy}^2 \right], \quad (4)$$

где $\tilde{x}_0 = \frac{\pi \times x_0}{a}$; $j = \sqrt{-1}$;

$\tilde{\lambda}$ – нормированная длина волны, $\tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{2 \times a}$;

x_0 – координата центра повреждения на широкой стенке равномерно изогнутого волновода; P_{yy} – коэффициент электрической поляризуемости пробоины;

M_{xx}, M_{zz} – компоненты тензора магнитной поляризуемости пробоины;

a, b – размер соответственно широкой и узкой стенки равномерно изогнутого волновода.

Математическая модель равномерно изогнутого волновода с вмятиной

Равномерно изогнутый волновод с вмятиной представлен реактивным четырехполюсником с эквивалентной схемой в виде шунта. Методом теории эквивалентных схем СВЧ получено соотношение для искомой модели $[T_{\text{поврк}}]$ через коэффициент отражения $\Gamma_{\text{вм}}$, который определяется путем решения вариационными методами интегрального уравнения для касательной компоненты полного магнитного поля с учетом

граничного условия исчезновения на поверхности вмятины касательной компоненты полного электрического поля:

$$\Gamma_{\text{вм}} = \frac{|\Gamma'_{\text{вм}}|}{1-|\Gamma'_{\text{вм}}|} \quad (5)$$

где

$$\Gamma'_{\text{вм}} = j \times \beta^2 \times \frac{2 \times R_{\text{вм}} \times a}{\pi \times \beta_b \times b} \times \sin^2 \tilde{x}_0 \times \sin^2 \left(\frac{\pi \times R}{a} \right).$$

Здесь $j = \sqrt{-1}$;

β – волновое число в неограниченной среде – $\beta = \frac{\pi}{\tilde{\lambda} \times a}$;

$\beta_b = \beta \times \sqrt{1-\tilde{\lambda}^2}$;

$R_{\text{вм}}$ – глубина вмятины.

Результаты исследования и их обсуждение

Средний уровень отражений и рабочего затухания в равномерно изогнутых волноводах с повреждениями на 25–30% выше, чем в регулярных волноводах с такими же повреждениями. Проведено оценивание

ожидаемых повреждений при применении противником по РЛС типовых боеприпасов. В результате разрыва боевой части противорадиолокационного снаряда типа «Шрайк» на расстоянии 5 м от РЛС 5Н87 следует ожидать около 90 повреждений АВТ (в том числе около 40 повреждений равномерно изогнутых волноводов). Указанные повреждения приведут к снижению ОСШ и уменьшению дальности обнаружения около 50% (при том гипотетическом условии, что остальные системы РЛС повреждены не будут). Данные результаты моделирования получены в предположении исправной работы всех функциональных устройств и систем РЛС, за исключением АВТ.

Предложены технические решения [6, 7] адаптивных АВТ РЛС, которые могут позволить повысить ОСШ по сравнению с известными в условиях осколочно-пулевого воздействия: покрытие волноводного тракта снаружи токопроводящей эластичной оболочкой, обладающей способностью затягивать образующиеся в результате осколочно-пулевого воздействия механические пробоины и тем самым восстанавливать в местах повреждений электродинамические свойства волноводного тракта [6]; построение АВТ на основе автоматических корректоров амплитудно-частотных характеристик, позволяющих частично или полностью устранить рассогласование входа и выхода АВТ в достаточно широком диапазоне частот, вызванное механическими пробоинами и/или вмятинами [7].

Заключение

Разработанные математические модели волноводов отличаются от известных дополнительным учетом потерь на излучение из возникающих пробоин и потерь на отражение от пробоин и вмятин. Указанные математические модели являются достаточно эффективными и точными, а их применение целесообразно на этапе проектирования АВТ перспективных РЛС. Предложенные технические решения [6, 7] адаптивных АВТ РЛС могут позволить повысить ОСШ по сравнению с известными в условиях осколочно-пулевого воздействия, улучшая тем самым приём полезного сигнала.

Список литературы

1. Ахияров В.В., Нефедов С.И., Николаев А.И., Служкин Г.П., Федоров И.Б., Шустиков В.Ю. Радиолокационные системы: учеб. пособие / Под ред. А.И. Николаева. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 349 с.
2. Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи: монография / Под ред. Л.И. Пономарева. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 197 с.
3. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Скольника. Пер. с англ. под общ. ред. В.С. Вербы: в 2 кн. М.: Техносфера, 2014. Кн. 1. 672 с.; кн. 2. 680 с.
4. Фальковский О.И. Техническая электродинамика: учебник. СПб.: Издательство «Лань», 2009. 432 с.
5. История отечественной радиолокации. 2-е изд. испр., доп. / Под ред. С.В. Хохлова. М.: ООО «Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2015. 736 с.
6. Гурский С.М., Тимофеев Г.С., Гелесев А.И., Гущин А.И., Никишин В.Н., Филиппов О.Г. Гибкий волновод // Патент РФ № 2121735. Патентообладатель Московское высшее училище радиозлектроники ПВО. 1998. Бюл. № 31 (II часть).
7. Гурский С.М. Автоматический корректор амплитудно-частотной характеристики // Патент РФ 2248650. Патентообладатель Гурский Сергей Михайлович. 2005. Бюл. № 8.