

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ НА НАДЕЖНОСТЬ РАДИОСИСТЕМЫ

**А. Н. Якимов**

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия  
y\_alder@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* По мере роста интенсивности воздушного движения летательных аппаратов радиосистемы управления воздушным движением (УВД) сталкиваются с проблемой обеспечения безопасности полетов. Количественно безопасность полетов оценивается допустимым риском столкновения летательных аппаратов, который в значительной мере определяется надежностью радиосистемы УВД. Под надежностью при этом понимается не только безотказность работы аппаратуры, но и вероятность потерь информации из-за провалов в зонах обзора, определяемых характеристиками направленности антенн, используемых в радиосистемах УВД. Перспективной возможностью повышения надежности таких систем является модельное исследование влияния формы главного лепестка диаграммы направленности (ДН) антенны запросчика на надежность радиосистемы УВД. *Материалы и методы.* Предложен подход к решению этой задачи, основанный на том, что вероятность потерь информации из-за провалов в зонах обзора определяется отклонением формы главного лепестка ДН антенны запросчика от идеального секторного вида. Получены расчетные выражения для оценки параметров, характеризующих надежность радиосистемы УВД при использовании ДН гауссовой формы и квазисекторной ДН, представленной модифицированным рядом Котельникова. Построена упрощенная математическая модель ДН трапецеидальной формы, позволяющая исследовать влияние крутизны скатов главного лепестка квазисекторной ДН на надежность радиосистемы УВД. *Результаты и выводы.* Дана численная оценка надежности радиосистемы на примере использования антенны с ДН гауссовой, квазисекторной и трапецеидальной формой главного лепестка. Приведены результаты модельного исследования влияния крутизны скатов главного лепестка ДН антенны на надежность радиосистемы. Полученные результаты указывают на перспективность использования антенны запросчика с ДН квазисекторной формы для повышения надежности радиосистемы УВД.

**Ключевые слова:** антенна, диаграмма направленности, главный лепесток, форма, радиосистема, надежность

**Для цитирования:** Якимов А. Н. Исследование влияния формы главного лепестка диаграммы направленности антенны на надежность радиосистемы // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 82–90. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-8

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE ANTENNA RADIATION PATTERN MAIN LOBE SHAPE ON THE RELIABILITY OF RADIO SYSTEM

**A.N. Yakimov**

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia  
y\_alder@mail.ru

**Abstract.** *Background.* As the intensity of aircraft air traffic increases, air traffic control (ATC) radio systems face the challenge of ensuring flight safety. Flight safety is quantified by the acceptable aircraft collision disk, which is largely determined by the reliability of the ATC radio system. Reliability is understood as only the reliability of the equipment, but also to the likelihood of information loss due to dips in the viewing areas determined by the directional characteristics of the antennas used in ATC radio systems. A perspective opportunity to increase the reliability of such systems is a model study of the effect of the shape of the main lobe of the radiation pattern of the interrogator on the reliability of the ATC radio system. *Materials and methods.* An approach to solving this problem is proposed based on

the fact that the probability of information loss due to dips in the viewing areas is determined by the deviation of the shape of the main lobe of the radiation pattern of the interrogator antenna from the ideal sector. Calculated expressions are obtained for estimating the parameters characterizing the reliability of the ATC radio system when using Gaussian-shaped radiation pattern and quasi-sector radiation pattern, represented by a modified Kotelnikov series. A simplified mathematical model of trapezoidal radiation pattern has been constructed, which makes it possible to study the effect of the slope of the main lobe of a quasi-sector radiation pattern on the reliability of the ATC radio system. *Results and conclusions.* A numerical assessment of the reliability of the radio system is given using the example of using an antenna with a Gaussian, quasi-sector and trapezoidal shape of the radiation pattern main lobe. The results of a model study of the effect the steepness of the radiation pattern main lobe of the antenna on the reliability of the radio system are presented. The results obtained indicate the prospects of using the antenna of the interrogator with the radiation pattern a quasi-sector shape to increase the reliability of the ATC radio system.

**Keywords:** antenna, radiation pattern, main lobe, shape, radio system, reliability

**For citation:** Yakimov A.N. Investigation of the influence of the antenna radiation pattern main lobe shape on the reliability of radio system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):82–90. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-8

## Введение

Радиосистемы управления воздушным движением (УВД) по мере роста интенсивности воздушного движения летательных аппаратов (ЛА) сталкиваются с проблемой обеспечения безопасности полетов. Количественно безопасность полетов оценивается допустимым риском столкновения ЛА, который определяется интенсивности движения ЛА, надежностью радиосистем навигации и УВД. При этом под надежностью радиосистем УВД понимается не только безотказность работы аппаратуры, но и вероятность потерь информации из-за провалов в зонах обзора, помех в каналах связи, погрешностей определения местоположения ЛА и другими факторами [1, 2].

В свою очередь, вероятность потерь информации из-за провалов в зонах обзора в значительной мере определяется характеристиками направленности антенн, используемых в радиосистемах УВД. Дальность действия таких систем пропорциональна напряженности электрической составляющей электромагнитного поля, формируемой антенной в направлении ЛА, и зависит от уровня диаграммы направленности (ДН). При работе таких систем в режиме обзора с активным ответом ЛА, перспективным для передачи запросного сигнала оказывается использование микроволновой антенны с ДН секторного вида.

Математический синтез такой ДН относят к некорректным задачам математической физики, решение которых может быть получено лишь с некоторым приближением, поэтому возникает задача оценки близости формируемой квазисекторной ДН к идеальной секторной ДН и вероятности потерь информации из-за провалов в зонах обзора, вызванных отклонением ДН от секторного вида [3–5].

Рассмотрим возможности модельной оценки влияния формы главного лепестка ДН антенны запросчика на надежность радиосистемы УВД, обусловленного потерей информации из-за провалов в зоне обзора.

## Постановка задачи

Для корректного исследования влияния формы главного лепестка ДН антенны запросчика на надежность радиосистемы УВД примем следующие допущения: пренебрегаем влиянием на надежность радиосистемы всех факторов, кроме потерь информации из-за провалов в зонах обзора, и полагаем нахождение ЛА в каждой точке сектора зоны обзора в заданный момент времени равновероятным. Полагаем также, что ДН антенны запросчика в вертикальной плоскости имеет косекансную форму, обеспечивающую равенство уровня запросного сигнала у антенны ответчика ЛА, летящего на заданной высоте, при любом его угловом положении в вертикальной плоскости относительно антенны запросчика, и исключено влияние боковых лепестков ДН. При работе радиосистемы УВД на максимальных дальностях из-за пропорциональности уровня сигнала запросчика уровню ДН его антенны полю в направлении местоположения ЛА и провалов в зонах обзора уровень сигнала запроса оказывается недостаточным для срабатывания ответчика и получения ответного сигнала ЛА [2, 6].

Таким образом, рабочая зона обзора радиосистемы УВД в горизонтальной плоскости в данный момент времени оказывается ограниченной интервалом углов между уровнями половинной мощности (–3 дБ) относительно максимума ДН антенны и дальностью действия радиосистемы в заданном угловом направлении, зависящей от формы ДН.

### Решение задачи

С учетом принятых допущений, вероятность потерь информации из-за провалов в зонах обзора определяется отклонением ДН антенны запросчика от секторного вида в горизонтальной плоскости обзора и может быть рассчитана по формуле [7]

$$P_{LI} = 1 - P_{RI} = 1 - \frac{S_{ML}}{S_{SECT}}, \quad (1)$$

где  $P_{LI}$  – вероятность потерь информации;  $P_{RI}$  – вероятность получения информации;  $S_{ML}$  – площадь главного лепестка произвольной формы ДН антенны запросчика в интервале углов, соответствующих максимуму и уровню половинной мощности;  $S_{SECT}$  – площадь главного лепестка идеальной секторной формы ДН антенны запросчика.

В общем виде площадь  $S$  сектора  $OAB$ , ограниченного кривой  $AB$  произвольной формы, заданной в полярных координатах функцией  $\rho = F(\varphi)$  в интервале углов  $\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_1$  и радиусами  $OA$  и  $OB$  (рис. 1), определяется интегралом [8]

$$S = \frac{1}{2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \rho^2 d\varphi = \frac{1}{2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} [F(\varphi)]^2 d\varphi, \quad (2)$$

где  $OAB$  – сектор, описывающий геометрическую форму главного лепестка в горизонтальном сечении ДН антенны запросчика радиосистемы;  $\varphi$  – угол в горизонтальной плоскости.

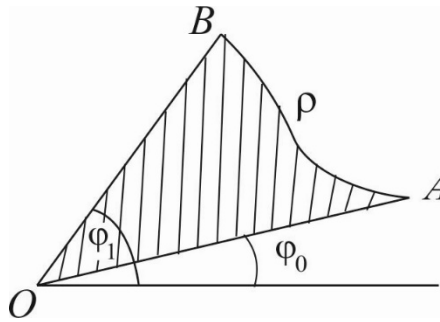


Рис. 1. Иллюстрация к расчету площади главного лепестка ДН антенны запросчика в горизонтальной плоскости

Главный лепесток идеальной секторной ДН  $F_{ML}(\varphi) = F_{SECT}(\varphi)$  можно представить как сектор круга с углом, равным ширине ДН на уровне половинной мощности, и описать следующим образом [5]:

$$F_{SECT}(\varphi) = \begin{cases} 1, & -\varphi_{0,5} \leq \varphi \leq \varphi_{0,5}; \\ 0, & \varphi < -\varphi_{0,5}, \varphi > \varphi_{0,5}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $F = E/E_{\max}$  – уровень нормированной амплитудной ДН по полю;  $E$  – напряженность электрической составляющей электромагнитного поля в произвольном направлении горизонтального сечения главного лепестка ДН;  $E_{\max}$  – напряженность электрической составляющей электромагнитного поля в направлении максимума главного лепестка ДН ( $\varphi = 0^\circ$ );  $\varphi$  – угол относительно оси излучения антенны, выраженный в градусах;  $2\varphi_{0,5} = \varphi_1 - \varphi_0$  (рис. 1) – ширина главного лепестка ДН на уровне половинной мощности.

После подстановки выражения (3) в формулу (2), в результате аналитического решения получим известную формулу, описывающую площадь  $S_{SECT}$  сектора круга [8]:

$$S_{ML} = S_{SECT} = \pi r^2 (2\varphi_{0,5}) / 360^\circ, \quad (4)$$

где  $r = E/E_{\max} = 1$  – уровень нормированной ДН по полю.

В соответствии с формулой (1), в радиосистеме УВД с ДН антенны запросчика идеальной секторной формы (3) вероятность получения информации  $P_{RI} = S_{ML} / S_{SECT} = 1$ , а вероятность потерь информации  $P_{LI} = 0$ .

Рассмотрим возможности модельной оценки параметров  $P_{RI}$  и  $P_{LI}$  в радиосистемах УВД с реальными ДН антенны запросчика. При однократной передаче сигнала запроса широко используют математическую модель главного лепестка амплитудной ДН гауссовой формы (рис. 2, кривая 1), описываемой выражением [9]

$$F_{ML}(\varphi) = r e^{-1,4\beta^2}, \quad (5)$$

где  $F_{ML}(\varphi)$  – функция, описывающая главный лепесток ДН;  $r = E/E_{\max} = 1$  – уровень нормированной ДН по полю;  $\beta = \varphi/(2\varphi_{0,5})$  – угол, нормированный к ширине ДН антенны.

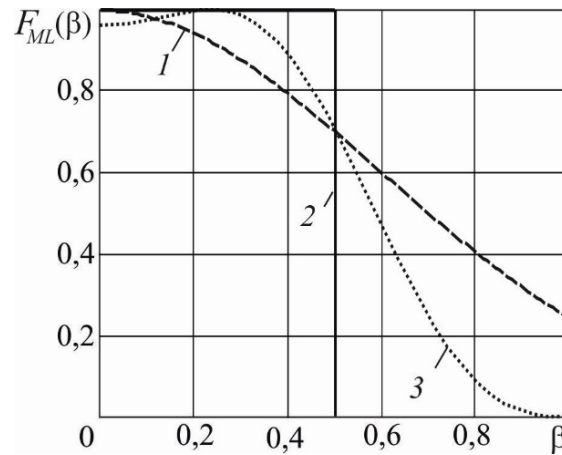


Рис. 2. Нормированные функции, описывающие рабочую зону главного лепестка амплитудной ДН запросчика в горизонтальной плоскости:  
1 – идеальная секторная; 2 – гауссова; 3 – квазисекторная

После подстановки выражения (5) в формулу (2) в результате аналитического решения получим расчетное выражение площади  $S_{ML}$  рабочей зоны главного лепестка ДН гауссовой формы, описываемого выражением (5) в следующем виде:

$$S_{ML} = 0,81 \pi r^2 (2\varphi_{0,5}) / 360^\circ. \quad (6)$$

В соответствии с формулой (1), в радиосистеме УВД с ДН антенны запросчика с гауссовой формой (5) вероятность получения информации  $P_{RI} = S_{ML} / S_{SECT} = 0,81$ , а вероятность потерь информации  $P_{LI} = 0,19$ .

При описании ДН антенн математическими выражениями, для которых получение аналитического решения по выражению (2) затруднительно, перспективным оказывается решение задачи в декартовой системе координат. В этом случае, если функция  $F_{ML}(\beta)$  является осесимметричной неотрицательной непрерывной на интервале  $-0,5 \leq \beta \leq 0,5$ , то площадь  $S_{ML}$  рабочей зоны главного лепестка ДН может быть получена путем численного интегрирования по выражению [8]

$$S_{ML} = \int_{-0,5}^{0,5} F_{ML}(\beta) d\beta = 2 \int_0^{0,5} F_{ML}(\beta) d\beta, \quad (7)$$

где  $\beta_1 = -0,5$ ;  $\beta_2 = 0,5$  – нормированные к  $2\varphi_{0,5}$  угловые положения  $\varphi$ , соответствующие уровню половинной мощности ДН ( $0,707 E_{\max}$ ), задающие сектор углов рабочей зоны главного лепестка.

В этом случае главный лепесток идеальной секторной ДН  $F_{ML}$  (рис. 2, кривая 2) описывается формулой

$$F_{ML}(\beta) = \begin{cases} 1, & -0,5 \leq \beta \leq 0,5; \\ 0, & \beta < -0,5, \beta > 0,5. \end{cases} \quad (8)$$

При решении задачи приближения математической модели реальной ДН антенны запросчика к модели секторной ДН перспективным является описание с квазисекторной ДН  $F_{ML}(\varphi)$  антенны модифицированным рядом Котельникова [5]:

$$F_{MLN}(\beta) = \frac{\sin z}{z} \cdot \frac{k_2 z_1^2 (z_1^2 - 1) + 3z_1^2 - z_1^4 + 4}{(z_1^2 - 1)(z_1^2 - 4)}, \quad (9)$$

где –  $F_{MLN}(\beta)$  – функция, описывающая ненормированную ДН антенны по полю в горизонтальной плоскости;  $z = \pi(l/\lambda)\sin[\beta(2\varphi_{0,5})]$ ;  $\beta(2\varphi_{0,5}) = [\varphi/(2\varphi_{0,5})] \cdot (2\varphi_{0,5}) = \varphi$  – угол в горизонтальной плоскости между направлением на точку наблюдения и нормалью к антенне;  $l$  – линейный размер главного сечения апертуры антенны в горизонтальной плоскости;  $\lambda$  – длина электромагнитной волны в свободном пространстве;  $k_2$  – коэффициент, управляющий формой ДН, величина которого находится в промежутке от 1 до 2;  $z_1 = z/\pi$ .

При этом коэффициент  $k_2$  связан с параметром  $\alpha_0 = 1/y_0$ , который характеризует долю противофазного участка в половине амплитудного распределения поля, где  $y_0$  – координата точки смены фазы в амплитудном распределении поля. Взаимосвязь между коэффициентом  $k_2$  и параметром  $\alpha_0$  на интервале изменения  $\alpha_0$  от 1,5 до 2,5 устанавливается выражением

$$k_2 = \frac{1 + 2 \cos(\pi / \alpha_0)}{1 - 2 \cos^2(\pi / \alpha_0)}. \quad (10)$$

Функция  $F_{ML}(\beta)$ , описывающая нормированную квазисекторную ДН антенны, используемую в расчете площади  $S_{ML}$  рабочей зоны главного лепестка ДН по формуле (7), получается как

$$F_{ML}(\beta) = \frac{F_{MLN}(\beta)}{F_{ML \max}}, \quad (11)$$

$F_{ML \max}$  – максимум функции (9), описывающей главный лепесток ДН, не всегда совпадающий с направлением оси излучения антенны  $\beta = 0$ .

Расчет квазисекторной ДН  $F_{ML}(\beta)$  по формулам (9) и (11) проводился в MatLAB для следующих параметров:  $l/\lambda=27$ ,  $k_2 = 0,7$  (рис. 2, кривая 3). При этом ширина квазисекторной ДН запросчика составила  $2\varphi_{0,5} = 6,6$ .

Распределение поля  $f(y)$  в горизонтальном сечении апертуры антенны (рис. 3), соответствующее рассматриваемой квазисекторной ДН антенны  $F_{ML}(\beta)$  и полученное с использованием модифицированного ряда Котельникова, описывается следующей формулой:

$$f(y) = 1 + 2 \cos \pi y + k_2 \cos 2\pi y, \quad (12)$$

где  $y = 2x/l$ ;  $x$  – расстояние до текущей точки главного сечения апертуры антенны относительно ее центра в горизонтальной плоскости.

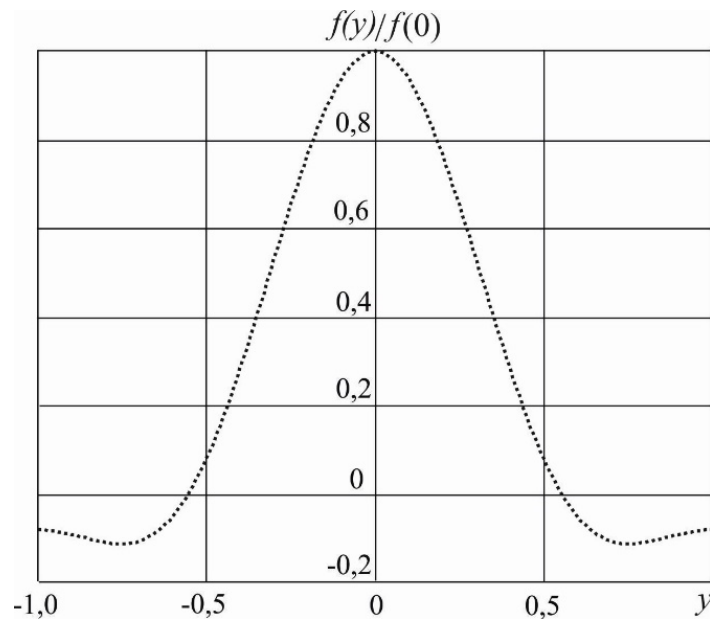


Рис. 3. Нормированное распределение поля в горизонтальном сечении апертуры антенны при  $k_2 = 0,7$

Это распределение поля имеет переменного-фазный вид и характеризуется следующими параметрами: максимальный уровень противофазных участков относительно максимума центрального участка равен  $-19$  дБ;  $\alpha_0 \approx 1,8$ .

Расчет площади  $S_{ML}$  рабочей зоны главного лепестка ДН квазисекторной формы (11) антенны запросчика в MatLAB по методу трапеций позволил получить следующие параметры надежности радиосистемы УВД: в соответствии с формулой (1) вероятность получения информации  $P_{RI} = S_{ML} / S_{SECT} = 0,94$ , а вероятность потерь информации  $P_{LI} = 0,06$  [10].

Таким образом, результаты модельной оценки влияния формы главного лепестка ДН запросчика радиосистемы на надежность этой радиосистемы показали, что переход от гауссовой формы главного лепестка к квазисекторной форме приводит к значительному снижению вероятности потерь информации (с  $P_{LI} = 0,19$  до  $P_{LI} = 0,06$ ).

Однако влияние таких параметров квазисекторной ДН, как крутизна ее скатов и величина провалов вблизи оси симметрии главного лепестка ДН на надежность радиосистемы, оказывается противоречивым. В рамках рассмотренной математической модели, представленной модифицированным рядом Котельникова, исследование независимого влияния этих параметров на надежность радиосистемы оказывается невозможным [5].

Приняв допущение об отсутствии провалов вблизи оси симметрии квазисекторной ДН (рис. 4, кривая 1), построим упрощенную математическую модель квазисекторной ДН в виде трапеции (рис. 4, кривая 2).

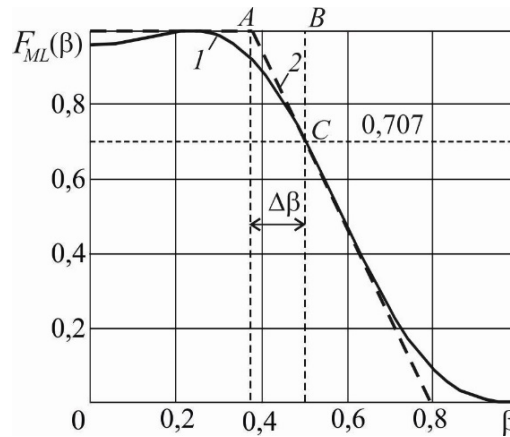


Рис. 4. Модельное представление нормированной квазисекторной ДН:  
1 – модифицированным рядом Котельникова при  $l/\lambda=27$ ,  $k_2=0,7$ ; 2 – трапецией

В соответствии с рис. 4 зона потенциального пропуска сигнала из-за отличия трапеции от идеального сектора определяется площадью  $S_{ABC}$  треугольника. Вследствие симметрии ДН вероятность потерь информации  $P_{LI}$  при этом будет определяться как

$$P_{LI} = S_{LI} / S_{SECT}, \quad (13)$$

где  $S_{LI} = 2S_{ABC}$  – площадь зоны потерь главного лепестка ДН;  $S_{ABC} = 0,5 \cdot (0,293 \cdot \Delta\beta)$ .

Вероятность получения информации  $P_{RI}$  при этом может быть определена по формуле

$$P_{RI} = 1 - P_{LI}. \quad (14)$$

На основе анализа формы трапеции на уровнях от  $-1$  до  $-20$  дБ и с учетом свойств подобных треугольников получим [8]

$$\Delta\beta \approx \frac{7}{\mu(2\phi_{0,5})}, \quad (15)$$

где  $\Delta\beta$  – величина стороны  $AB$  треугольника  $ABC$ ;  $\mu$  – крутизна скатов трапеции, дБ/град;  $2\phi_{0,5}$  – ширина главного лепестка ДН на уровне половинной мощности, град.

С учетом выражений (13), (15) и значения площади  $S_{SECT} = 1$ , нормированной идеальной секторной ДН, получим выражение для определения вероятности потерь информации  $P_{LI}$

$$P_{LI} \approx \frac{2,05}{\mu(2\varphi_{0,5})}. \quad (16)$$

Выражения (13)–(16) позволяют провести необходимые модельные исследования влияния крутизна скатов ДН антенны запросчика на характеристики надежности радиосистемы и представляют собой упрощенную математическую модель надежности этой радиосистемы.

### Полученные результаты

Расчеты характеристик надежности радиосистемы УВД, проведенные для квазисекторной ДН запросчика шириной  $2\varphi_{0,5} = 6,6$  град в интервале изменения крутизны скатов  $\mu$  от 2 до 12 дБ/град, показали следующие результаты (рис. 5, кривые 1 и 2).

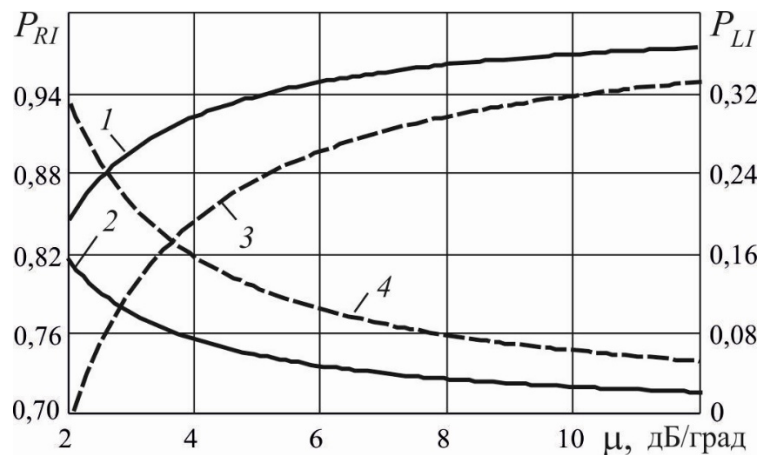


Рис. 5. Характеристики надежности радиосистемы:  
 1 –  $P_{RI}$  для  $2\varphi_{0,5} = 6,6^\circ$ ; 2 –  $P_{LI}$  для  $2\varphi_{0,5} = 6,6^\circ$ ;  
 3 –  $P_{RI}$  для  $2\varphi_{0,5} = 3,3^\circ$ ; 4 –  $P_{LI}$  для  $2\varphi_{0,5} = 3,3^\circ$

Влияние крутизны скатов на параметры, характеризующие надежность радиосистемы существенно, причем вероятность приема информации  $P_{RI}$  оказывается немного завышенной, так как эта модель не учитывает провалы (пульсации) вблизи оси симметрии главного лепестка ДН. Так, например, вероятность получения информации в радиосистеме с квазисекторной ДН антенны (рис. 4, кривая 1) и крутизной скатов  $\mu \approx 7$  дБ/град составляет  $P_{RI} \approx 0,94$ . Представление главного лепестка ДН в виде трапеции (рис. 4, кривая 2) при той же крутизне скатов уже составляет  $P_{RI} \approx 0,955$  (рис. 5, кривая 1), а вероятность потерь информации при этом равна  $P_{LI} = 0,045$  (рис. 5, кривая 2). Зависимости вероятностей  $P_{RI}$  и  $P_{LI}$  от крутизны скатов  $\mu$  нелинейные и при значениях  $\mu > 8$  дБ/град рост  $P_{RI}$  и уменьшение  $P_{LI}$  становятся незначительными.

Изменение ширины главного лепестка ДН  $2\varphi_{0,5}$  при заданной крутизне  $\mu$  также значительно влияет на характеристики надежности рассматриваемой радиосистемы. Например, при  $2\varphi_{0,5} = 3,3^\circ$  и  $\mu \approx 7$  дБ/град вероятность получения информации в радиосистеме с главным лепестком ДН антенны в виде трапеции (рис. 5, кривая 3) составляет  $P_{RI} \approx 0,91$ , а вероятность потерь информации при этом равна  $P_{LI} = 0,09$  (рис. 5, кривая 4).

Таким образом, при уменьшении ширины главного лепестка ДН  $2\varphi_{0,5}$  влияние крутизны  $\mu$  скатов на параметры  $P_{RI}$  и  $P_{LI}$ , характеризующие надежность, оказывается более существенным и это необходимо учитывать при проектировании антенн.

Полученные результаты указывают на перспективность использования квазисекторной формы ДН запросчика радиосистемы УВД для повышения ее надежности за счет уменьшения потерь информации из-за провалов в зонах обзора и уменьшения при этом зон потенциального пропуска сигнала.

### Заключение

Предложенный подход к модельной оценке и исследованию надежности радиосистемы УВД вероятностями приема и потерь информации из-за провалов в зонах обзора, обусловленных отличием

формы главного лепестка реальной ДН антенны запросчика от идеальной секторной формы, позволяет исследовать влияние формы ДН на надежность радиосистемы. Полученные результаты указывают на возможность повышения надежности радиосистемы УВД за счет использования квазисекторной формы ДН антенны запросчика и оптимизации таких параметров ДН, как крутизна скатов и величина провалов вершины ее главного лепестка. При этом необходимо использовать перспективные способы формирования квазисекторной ДН и контроля ее параметров при проектировании [11, 12].

### Список литературы

1. Бычков С. И., Пахолков Г. А., Яковлев В. Н. Радиотехнические системы предупреждения столкновения самолетов. М. : Сов. радио, 1977. 272 с.
2. Грачев В. В., Кейн В. М. Радиотехнические средства управления воздушным движением. М. : Транспорт, 1975. 344 с.
3. Минкович Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. М. : Сов. радио, 1969. 296 с.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1974. 224 с.
5. Якимов А. Н. Условия формирования секторной диаграммы направленности с минимальным уровнем боковых лепестков // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. 1980. Вып. 4. С. 79–80.
6. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. : Высш. шк., 1988. 432 с.
7. Якимов А. Н. Оценка влияния антенны на надежность радиосистемы // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС : межвуз. сб. науч. тр. Пенза : Изд-во Пенз. политехн. ин-та, 1991. Вып. 3. С. 71–74.
8. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1980. 976 с.
9. Покрас А. М., Цирлин В. М., Кудяров Г. Н. Системы наведения антенн земных станций спутниковой связи. М. : Связь, 1978. 152 с.
10. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В., Круглов В. В. MatLAB 5.3.1 с пакетами расширений / под ред. В. П. Дьяконова. М. : Нолидж, 2001. 880 с.
11. Якимов А. Н. Методы определения параметров при расчете диаграммы направленности антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 74–75.
12. Якимов А. Н. Универсальная модель излучения микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 5–12.

### References

1. Bychkov S.I., Pakholkov G.A., Yakovlev V.N. *Radiotekhnicheskiye sistemy preduprezhdeniya stolknoveniya samoletov* = *Radio engineering systems for aircraft collision prevention*. Moscow: Sov. radio, 1977:272. (In Russ.)
2. Grachev V.V., Keyn V.M. *Radiotekhnicheskiye sredstva upravleniya vozdushnym dvizheniyem* = *Radio engineering means of air traffic control*. Moscow: Transport, 1975:344. (In Russ.)
3. Minkovich B.M., Yakovlev V.P. *Teoriya sinteza antenn* = *Theory of antenna synthesis*. Moscow: Sov. radio, 1969:296. (In Russ.)
4. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* = *Methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Nauka, 1974:224. (In Russ.)
5. Yakimov A.N. Conditions for the formation of a sectoral directional pattern with a minimum level of side lobes. *Voprosy radioelektroniki. Seriya obshchetekhnicheskaya* = *Issues of radio electronics. The series is general technical*. 1980;(4):79–80. (In Russ.)
6. Sazonov D.M. *Antenny i ustroystva SVCH* = *Antennas and microwave devices*. Moscow: Vyssh. shk., 1988:432. (In Russ.)
7. Yakimov A.N. Evaluation of the antenna's influence on the reliability of the radio system. *Tsifrovyye modeli v proyektirovani i proizvodstve RES: mezhvuz. sb. nauch. tr.* = *Digital models in the design and production of thermal power plants : interuniversity collection of scientific papers*. Penza: Izd-vo Penz. politekhn. in-ta, 1991;(3):71–74. (In Russ.)
8. Bronshteyn I.N., Semendiyayev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* = *Handbook of mathematics for engineers and students of higher education institutions*. Moscow: Nauka, 1980:976. (In Russ.)
9. Pokras A.M., Tsirlin V.M., Kudiyarov G.N. *Sistemy navedeniya antenn zemnykh stantsiy sputnikovoy svyazi* = *Antenna guidance systems for Earth stations of satellite communications*. Moscow: Svyaz', 1978:152. (In Russ.)
10. D'yakonov V.P., Abramenkova I.V., Kruglov V.V. *MatLAB 5.3.1 s paketami rasshireniy* = *MatLAB 5.3.1 with extension packages*. Moscow: Nolidzh, 2001:880. (In Russ.)
11. Yakimov A.N. Methods for determining parameters when calculating the antenna radiation pattern. *Trudy Mezhdu-narodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* = *Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;1:74–75. (In Russ.)
12. Yakimov A.N. Universal model of microwave antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):5–12. (In Russ.)



**Информация об авторах / Information about the authors**

**Александр Николаевич Якимов**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры конструирования  
и технологий электронных и лазерных средств,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67)  
E-mail: y\_alder@mail.ru

**Aleksandr N. Yakimov**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of the sub-department of construction  
and technology of electronic and laser equipment,  
Saint Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation  
(67 Bolshaya Morskaya street,  
Saint Petersburg, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /**

**The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 21.07.2025**

**Поступила после рецензирования / Revised 25.08.2025**

**Принята к публикации / Accepted 15.09.2025**