

## **Модель оценки эффективности РЛС в условиях активных шумовых помех**

А.В. Леньшин<sup>1</sup>, Е.В. Кравцов<sup>1</sup>, М.О. Лихоманов<sup>1</sup>, А.Р. Рюмшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а  
E-mail: evgenijkravtsov@mail.ru

<sup>2</sup> Акционерное общество «Головное производственно-техническое предприятие «Гранит»  
121467, г. Москва, ул. Молодогвардейская, 7  
E-mail: ruandreij@yandex.ru

*Предложена модель, позволяющая оценить эффективность РЛС обнаружения в условиях активных шумовых помех с учетом наиболее важных факторов: направленных свойств фазированной антенной решетки, обработки сигналов в РЛС и интерференции при распространении радиоволн. С использованием разработанной модели представлены диаграмма направленности антенной решетки РЛС в азимутальной плоскости, зона обнаружения РЛС в условиях активных шумовых помех с учетом интерференции радиоволн. Ключевые слова: РЛС обнаружения, активные шумовые помехи, диаграмма направленности, антенная решетка, интерференция радиоволн.*

## **A model for evaluating the effectiveness of radar in conditions of active noise interference**

A.V. Lenshin<sup>1</sup>, E.V. Kravtsov<sup>1</sup>, M.O. Likhomanov<sup>1</sup>, A.R. Ryumshin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin» (Voronezh)  
394064, Voronezh, 54a StarykhBolshevikov str.  
E-mail: evgenijkravtsov@mail.ru

<sup>2</sup> Joint-Stock Company «Head Production and Technical Enterprise «Granit»

*A model is proposed that allows us to evaluate the effectiveness of radar detection in conditions of active noise interference, taking into account the most important factors: the directional properties of the phased array antenna, signal processing in the radar and interference in the propagation of radio waves. Using the developed model, the radiation pattern of the radar antenna array in the azimuthal plane, the radar detection zone in the conditions of active noise interference, taking into account the interference of radio waves, are presented. Keywords: radar detection, active noise interference, radiation pattern, antenna array, radio wave interference.*

## **Введение**

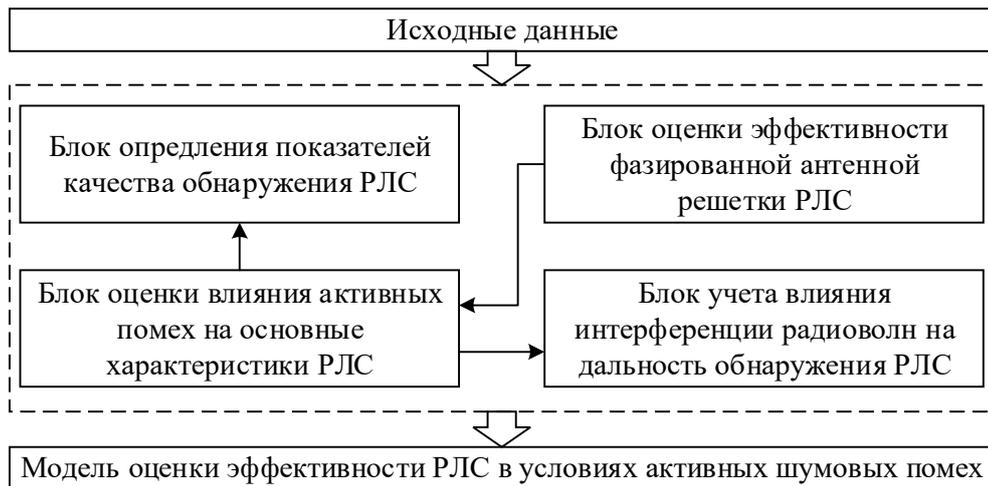
При подготовке и в ходе проведения воздушных наступательных операций большое внимание уделяется радиоэлектронному подавлению радиолокационных станций (РЛС) обнаружения. Использование малых высот при преодолении противовоздушной обороны и перспективных способов создания помех в современных комплексах радиоэлектронного подавления [1–3] существенно затрудняет обнаружение воздушных целей. Это необходимо учитывать при разработке перспективных наземных РЛС обнаружения воздушных объектов и модернизации существующего парка РЛС. При выборе вариантов построения таких РЛС требуется принимать во внимание следующие важные факторы: воздействие активных шумовых помех, направленные

свойства фазированной антенной решетки, обработку сигнала в РЛС, интерференцию при распространении радиоволн. Для этого необходимо разработать модель оценки эффективности РЛС в условиях активных шумовых помех.

Цель работы – разработка модели оценки эффективности РЛС в условиях активных шумовых помех с учетом направленных свойств фазированной антенной решетки, обработки сигнала в РЛС, интерференции при распространении радиоволн.

**Модель оценки эффективности РЛС в условиях активных шумовых помех**

Структура модели оценки эффективности РЛС обнаружения воздушных целей в условиях активных шумовых помех иллюстрируется рисунком 1.



**Рис. 1. Структура модели оценки эффективности РЛС в условиях активных шумовых помех**

Исходные данные вводятся через интерактивную форму ввода, представленную на рисунке 2.

**Рис. 2. Интерактивная форма ввода модели оценки эффективности РЛС в условиях активных шумовых помех**

Исходные данные включают: основные параметры РЛС; параметры антенны РЛС; характеристики постановщика помех; параметры цели; амплитуду и фазу коэффициента отражения от земной поверхности; данные для вычислений: точки начала и окончания вычислений по азимуту; шаг прямоугольной азимутально-дальностной сетки вычислений; размер сетки вычислений (максимальную дальность). Разработанная модель включает: блок оценки эффективности фазированной антенной решетки РЛС; блок оценки влияния активных помех на основные характеристики РЛС; блок определения показателей качества обнаружения РЛС; блок учета влияния интерференции радиоволн на дальность обнаружения РЛС.

Блок оценки эффективности фазированной антенной решетки РЛС позволяет: определить основные параметры фазированной антенной решетки (эффективность апертуры, коэффициент направленного действия (КНД), коэффициент усиления); построить диаграмму направленности антенны (ДНА) в азимутальной плоскости.

Антенная система РЛС в модели представляет собой прямоугольную апертуру изотропных элементов (фазированную антенную решетку) размером  $L_x$  по азимуту и  $L_y$  по углу места, с механическим сканированием по азимуту, направленную на цель, структура которой представлена на рисунке 3. Это плоская двумерная фазированная антенная решетка (ФАР), элементы которой расположены в плоскости  $x - y$ , а ось  $z$  при механическом сканировании по азимуту всегда направлена на цель. Таким образом при расчетах зоны обнаружения предполагается, что ширина луча антенны не изменяется. В направлении оси  $x$  решетка имеет  $M$  элементов в виде параллельных строк с расстоянием  $d_x$ . В направлении оси  $y$  размещены  $N$  элементов – столбцов, расположенных параллельно на расстоянии  $d_y$  друг от друга. Общее число элементов решетки равно  $M \cdot N$ .  $L_x \approx M d_x$ ;  $L_y \approx N d_y$ ;  $d_x = d_y = \lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны РЛС.

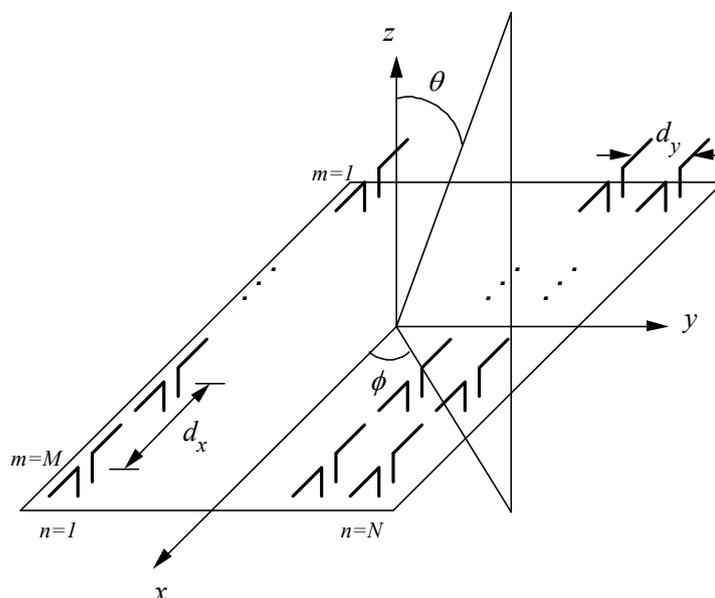


Рис. 3. Структура фазированной антенной решетки

Диаграмму направленности такой ФАР можно записать в следующем виде [3]

$$F(\theta, \varphi) = F_x(\theta, \varphi) \cdot F_y(\theta, \varphi). \quad (1)$$

ДНА по азимуту в модели определяется выражением

$$F_x(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M A_m \exp(jk d_x \sin \theta \sin \varphi (m-1)), \quad (2)$$

где  $A_m$  – амплитуда возбуждения  $m$ -го излучателя;  $k = 2\pi/\lambda$ .

Если уровень боковых лепестков ДНА  $G_B \leq -15$  дБ для определения  $A_m$  используется  $P$ -параметрическое амплитудное распределение Тейлора ( $P = 5$ )

$$A_m = 1 + 2 \sum_{p=1}^{P-1} W(p, V, P) \cos \left( p\pi \frac{d_x(m-1)}{L_x} \right), \quad (3)$$

где  $W(p, V, P) = \frac{[(P-1)!]^2}{(P-1+p)!(P-1-p)!} \prod_{r=1}^{p-1} \left[ 1 - \frac{p^2}{\zeta_r^2} \right]$ ;  $\zeta_r^2 = (V^2 + (r-0,5)^2) \cdot \omega^2$ ;

$$\omega^2 = \frac{P^2}{V^2 + (P-0,5)^2}; V = \frac{1}{\pi} \ln \left[ G_B + \sqrt{G_B^2 - 1} \right] \quad [3].$$

В случае если  $G_B > -15$  дБ, то используется равномерное амплитудное распределение  $A_m = 1$ .

Эффективность апертуры ДНА по азимуту определяется следующим образом

$$\rho_A = \frac{\left( \sum_{m=1}^M A_m \exp(jkd_x \sin \theta \sin \varphi(m-1)) \right)^2}{\left( \sum_{m=1}^M A_m \right)^2}. \quad (4)$$

По углу места в модели используется следующая аппроксимация ДНА

$$F_y(\theta, \varphi) = \sin \left( \frac{kL_y}{2} \sin \theta \cos \varphi \right) \left/ \left( \frac{kL_y}{2} \sin \theta \cos \varphi \right) \right. \quad (5)$$

Для аппроксимации заднего лепестка ДНА используется амплитудное распределение косинус квадрат на пьедестале

$$F_z(\theta) = (1 - G_z) \cos^2(\theta/2) + G_z, \quad (6)$$

где  $G_z$  – уровень заднего лепестка ДНА [4].

КНД такой ФАР описывается выражением

$$D_{\text{ФАР}}(\theta, \varphi) = (4\pi L / \lambda^2) \rho_A F_y^2(\theta, \varphi) F_z^2(\theta), \quad (7)$$

где  $L = L_x L_y$  – размер апертуры ФАР.

Коэффициент усиления антенной решетки имеет следующий вид

$$G(\theta, \varphi) = D_{\text{ФАР}}(\theta, \varphi) \eta, \quad (8)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия ФАР.

На рисунке 4 представлены зависимости коэффициента усиления антенной решетки РЛС в азимутальной плоскости, полученный по исходным данным, показанным на рисунке 2.

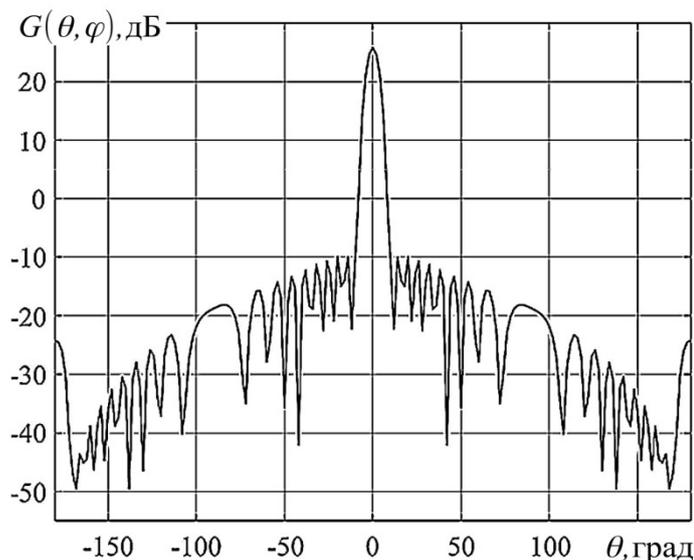
Блок оценки влияния активных помех на основные характеристики РЛС позволяет определить дальность обнаружения РЛС в условиях активных помех и построить зону обнаружения РЛС.

Мощность помехи на входе приемного устройства РЛС в модели имеет вид

$$P_{\text{Пвх}} = \frac{P_{\Pi} G_{\Pi} G(\theta_{\Pi}, \varphi_{\Pi}) \lambda^2 \Delta f_{\Pi}}{(4\pi R_{\Pi})^2 \Delta f_{\Pi}}, \quad (9)$$

где  $P_{\Pi}$ ,  $G_{\Pi}$  – излучаемая мощность помехи в полосе пропускания приемного устройства РЛС и коэффициент усиления антенны постановщика помех (ПП) в направлении на РЛС;  $G(\theta_{\Pi}, \varphi_{\Pi})$  – значение коэффициента усиления антенны РЛС в

направлении на ПП;  $\Delta f_{\text{ПР}}$  – ширина полосы пропускания линейной части приемного устройства РЛС;  $\Delta f_{\text{П}}$  – ширина спектра помехи;  $R_{\text{П}}$  – наклонная дальность до ПП [5].



**Рис. 4. Коэффициент усиления антенной решетки РЛС в азимутальной плоскости**

В модели определяется значение дальности обнаружения цели РЛС в условиях помех следующим образом

$$R_{\text{обн}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{изл}} G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}} K_{\text{сж}}}{(4\pi)^3 k_p (\sigma_{\text{ш}}^2 + P_{\text{пвх}}) L_{\text{П}}}}, \quad (10)$$

где  $P_{\text{изл}}$  – мощность излучаемого (зондирующего) сигнала РЛС;  $\sigma_{\text{ц}}$  – ЭПР цели;  $K_{\text{сж}}$  – коэффициент сжатия сложного сигнала, используемого в РЛС;  $k_p$  – коэффициент различимости РЛС;  $\sigma_{\text{ш}}^2$  – мощность собственных (внутренних) шумов приемного устройства РЛС;  $L_{\text{П}} = \prod_{i=1}^N L_i, i = \overline{1, N}$  – коэффициент потерь, характеризует потери в тракте приема-передачи РЛС ( $L_{\text{П}} = 5$  дБ);  $L_i$  – коэффициент потерь в  $i$ -м элементе тракта приема-передачи [5].

Мощность собственных шумов приемного устройства вычисляется в соответствии с выражением

$$\sigma_{\text{ш}}^2 = k_b T N_{\text{ш}} \Delta f_{\text{ПР}},$$

где  $k_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$  (Вт·с/°К) – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура (°К);  $N_{\text{ш}}$  – коэффициент шума приемного устройства РЛС.

Блок определения показателей качества обнаружения РЛС позволяет определять вероятности правильного обнаружения  $D$  и ложной тревоги  $F$  в условиях помех. Для случая некогерентного накопления  $K$  импульсов на выходе квадратичного детектора в условиях стационарных гауссовских помех показатели качества обнаружения имеют вид

$$D = 1 - \Gamma\left(\frac{S_0}{q^2 + 2(1 + v^2)}, K\right); F = D|_{q=0}, \quad (11)$$

где  $v^2, q^2$  – нормированные к мощности внутреннего шума  $\sigma_{ш}^2$  значения мощности помехи и сигнала соответственно;  $S_0$  – значение порога обнаружения, нормированное к  $\sigma_{ш}$ ;  $\Gamma(\cdot)$  – неполная гамма-функция [6].

Вычисление вероятности правильного обнаружения  $D$  проводится в модели по критерию Неймана-Пирсона (при  $F = const$ ). Оптимальный порог обнаружения  $S_0$  вычисляется методом «золотого» сечения [7].

Для определения показателей качества обнаружения могут быть использованы методики, представленные в [8], в которых применяются полученные аналитические выражения и аппроксимации распределений рядом Грамма-Шарлье в приближении Эджворта для широкого класса моделей сигналов, в том числе малозаметных, малоразмерных целей и устройств обнаружения РЛС, в условиях стационарных гауссовских, шумовых импульсных помех, а также в беспомеховой обстановке.

Блок учета влияния интерференции радиоволн на дальность обнаружения РЛС выполняет расчет множителя ослабления для РЛС с определенными параметрами (используемый частотный диапазон, параметры антенной системы, высота ее установки над поверхностью земли), заданных характеристик отражающей поверхности (амплитуда, фаза коэффициента отражения), высоты полета цели [9, 10].

При радиолокации целей на малых высотах, особенно в дециметровом и метровом диапазонах длин волн, большое влияние на работу РЛС оказывает наличие вблизи нее отражающей поверхности. Излучаемые антенной РЛС импульсы достигают цели двумя путями – непосредственно и за счет отражения от земной (водной) поверхности. При этом напряженности электромагнитного поля являются результатом сложения полей прямой и отраженной волн, зависят от их амплитуд, фазовых соотношений. Отраженная волна имеет меньшую амплитуду по сравнению с падающей и оказывается сдвинутой по фазе относительно нее. Возникает интерференция прямой и отраженной волн, что может привести к усилению электромагнитного поля в отдельных направлениях, и ослаблению почти до нуля – в других.

На рисунке 5 представлена схема распространения радиоволн при отражениях от земной поверхности.

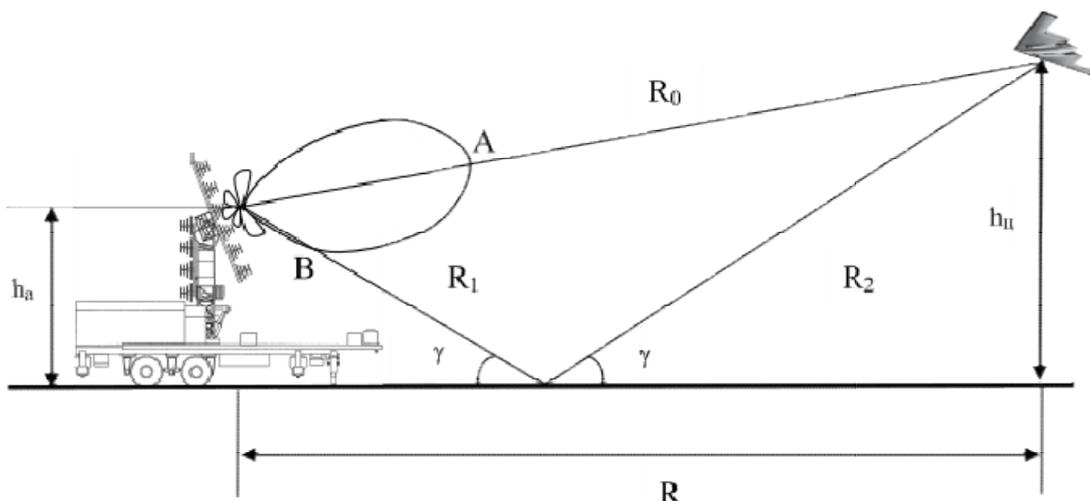


Рис. 5. Схема распространения радиоволн при отражениях от земной поверхности

Амплитудные и фазовые соотношения определяются свойствами отражающей поверхности, плоскостью поляризации, длиной волны, падающей на отражающую поверхность.

Блок учета влияния интерференции радиоволн на дальность обнаружения РЛС выполняет расчет множителя ослабления  $K_{OC}$ , который характеризует степень влияния отражений от земной (водной) поверхности, равен отношению амплитуд напряженности поля результирующей  $E_{PE3} = E_{IP} + E_{OTR}$  и прямой  $E_{IP}$  волн. Множитель  $K_{OC}$  показывает во сколько раз амплитуда напряженности поля сигнала при наличии отражений от земли отличается от амплитуды напряженности поля в свободном пространстве, он определяется следующим образом

$$K_{OC} = 1 + K_{OTR} \cdot e^{j\varphi} \frac{f_B(\theta, \varphi)}{f_A(\theta, \varphi)} e^{-j \frac{2\pi\Delta R}{\lambda}} \quad (12)$$

где  $K_{OTR} = E_{OTR} / E_{IP}$ ,  $\varphi$  – амплитуда и фаза коэффициента отражения соответственно;  $E_{OTR}$  – амплитуда отраженной волны;  $f_A(\theta, \varphi)$ ,  $f_B(\theta, \varphi)$  – значения нормированной диаграммы направленности антенны РЛС в точках А и В соответственно (рисунок 5);  $\Delta R = (R_1 + R_2) - R_0$  – разность хода между отраженной и прямой волной;  $\lambda$  – длина волны РЛС [5].

В случае, если основной лепесток ДНА РЛС направлен на цель  $f_A(\theta, \varphi) = 1$ , высота фазового центра антенны мала и цель маловысотная ( $h_A, h_{Ц} \ll R_0$ ), разность хода  $\Delta R \approx 2h_A h_{Ц} / R_0$ . Тогда выражение (12) для множителя ослабления значительно упрощается:  $K_{OC} = 2 \sin(2\pi h_{Ц} h_A / \lambda R_0)$ .

При расчете коэффициента ослабления в модели учитываются исходные данные, заданные в разделах: «Данные для вычислений» и «Отражения от ЗП» интерактивной формы ввода, представленной на рисунке 2. С учетом результатов вычислений определяются как

$$Q_i = P_{СВХ i} / (P_{ПВХ i} + \sigma_{П}^2), \quad i = \overline{1, I}, \quad (13)$$

где  $I$  – количество вычисляемых значений, которые сравниваются с  $k_p$ ;  $P_{СВХ i}$  – мощность сигнала на входе приемного устройства РЛС.

В результате сравнения формируется множество точек  $\Omega = \{Q_i \in Q \mid Q_i \geq k_p\}$ , в котором  $k_p$  превышен, отображается контур этого множества. На рисунке 6 представлена зона обнаружения РЛС, полученная с использованием разработанной модели оценки эффективности РЛС в условиях активных шумовых помех для  $D = 0,58$  и  $F = 10^{-6}$  по исходным данным, отображаемым в форме ввода на рисунке 2.

На рисунке 7 представлены результаты расчетов с учетом коэффициента отражения ( $K_{OTR} = -1$ ) для следующих исходных данных. Параметры РЛС:  $k_p = 10$  дБ;  $P_{ИЗЛ} = 10$  дБ/Вт;  $K_{СЖ} = 5$  дБ;  $\Delta f_{IP} = 1$  МГц;  $K = 1$ ;  $T = 290$  К. Данные ПП: высота 100 м;  $R_{П} = 20$  км;  $P_{П} = 2$  Вт;  $G_{П} = 1$  дБ;  $\Delta f_{П} = 2$  МГц. Данные цели:  $h_{Ц} = 100$  м;  $\sigma_{Ц} = 5$  дБ/м<sup>2</sup>, остальные исходные данные представлены в форме ввода на рисунке 2.



Рис. 6. Зона обнаружения РЛС в условиях активных шумовых помех

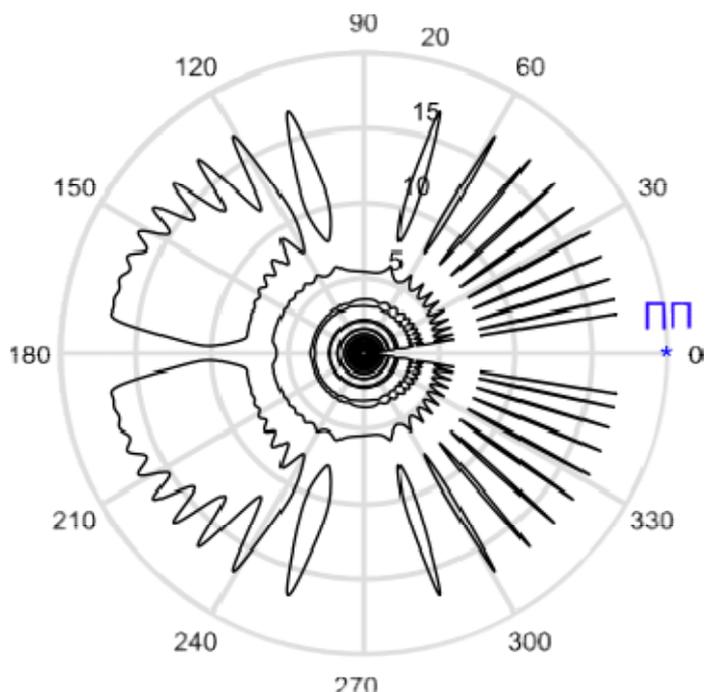


Рис. 7. Результаты расчетов с учетом коэффициента отражения

### Выводы

Разработанная модель оценки эффективности РЛС в условиях активных шумовых помех может использоваться для определения обобщенного показателя качества РЛС при проведении технико-экономического анализа и выбора вариантов построения перспективных наземных РЛС обнаружения воздушных объектов.

### Литература

1. Бортовые системы и комплексы радиоэлектронного подавления. Воронеж: «Научная книга», 2014. 590 с.
2. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. М.: Вузовская книга, 2018. 190 с.
3. Леньшин А.В. Бортовые комплексы обороны самолетов и вертолетов: учебное пособие. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2018. 312 с.
4. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 559 с.
5. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1964. 732 с.
6. Конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы. Методы анализа и синтеза / Под ред. С.В. Ягольникова. М.: Радиотехника, 2015. 312 с.
7. Прокопенко Н.Ю. Методы оптимизации. Учебное пособие. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2018. 121 с.
8. Платонов А.Ю., Помазуев О.Н, Миронов А.М., Ф.Н. Абу-Абед, Рюмшин А.Р., Методика определения показателей качества обнаружения радиолокационных станций // Программные продукты и системы. 2014. № 2. С.118–124.
9. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Автоматизированная методика расчета коэффициента реального затухания электромагнитных полей / Е.В. Кравцов, Громовая Н.В., Бобрешов В.В., Стадников М.Д. № 2014661914 (РФ); зарег. 18.11.2014.
10. Допира Р.В., Кордюков Р.Ю., Беглецов А.А., Попов П.Г., Рюмшин А.Р. Метод технико-экономического анализа вариантов построения наземных радиолокационных станций // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2012. № 2. С.44–48.