

УДК 621.396.98

Федоренко Владимир Васильевич, Сивакозов Александр Иванович

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕЛЕНГАЦИИ И МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ

Рассматривается методика моделирования системы определения места источника излучений, закрытого для прямой радиовидимости, по отраженным лучам с учетом погрешностей пеленгов и неопределенностей значений параметров модели.

Ключевые слова: источник радиоизлучений, пеленг, погрешности, моделирование.

Fedorenko Vladimir Vasilievich, Sivakozov Aleksandr Ivanovich
THE MODELING OF DIRECTION FINDING SYSTEM AND LOCATION DETERMINATION OF CLOSED RADIO EMISSION SOURCES

The method of location determination modeling system of emission sources closed to direct range by the reflected rays in view account the errors of bearings and uncertainties values of the model parameters is considered.

Key words: source of the radio emissions, peleng, errors, modeling.

В [1] изложена методика пеленгации источника радиоизлучений (ИРИ), закрытого для прямой радиовидимости, в соответствии с которой местоположение ИРИ определяется по радиолучам, отраженным от зданий (в городских условиях) либо от горных массивов. При этом предполагается известным произведение величин $R_{ИОj}R_{ОПj} = a_j^2(U_{ex,j})$ для некоторых фиксированных значений $U_{ex,j}$ – напряжения сигнала на входе приемника пункта радиоконтроля (ПРК). Здесь $R_{ИОj}$ – расстояние от ИРИ до j -го отражающего объекта (ОО); $R_{ОПj}$ – расстояние от j -го ОО до приемника ПРК.

Утверждение о постоянстве величины $a_j^2 = R_{ИОj}R_{ОПj} = const(j)$ следует из математической модели зоны формирования отраженных лучей «закрытого» ИРИ в виде линий Кассини в случае наличия информации о неизменных значениях параметров передатчика ИРИ (мощности $P_{И}$; коэффициента усиления $G_{И}$ и высоты h_1 передающей антенны; коэффициента полезного действия (КПД) тракта от передатчика к антенне $\eta_{И}$), приемника ПРК (входного сопротивления ω_{ex} , коэффициента усиления $G_{П}$ и высоты h_2 приемной антенны; КПД передачи тракта от приемной антенны к приемнику $\eta_{П}$), а также высоты отражающего объекта h_0 [2]:

$$R_{ИО} \cdot R_{ОП} = \sqrt{(h_1^2 + h_0^2)(h_0^2 + h_2^2)} \frac{\sqrt{P_{И} G_{И} \eta_{И} G_{П} \eta_{П} \omega_{ex}}}{U_{ex}} = const(R_{ИО} \cdot R_{ОП}). \quad (1)$$

Точность определения местоположения ИРИ зависит от многих факторов, к числу которых относится ошибка пеленга, обусловленная угловыми погрешностями δ_j определения азимутов (направлений в горизонтальной плоскости) θ_j поступления радиолучей на вход приемника ПРК с уровнями $U_{ex,j}$, а также погрешность модели (1). В статье рассматривается методика моделирования системы пеленгации и местоопределения (СПМ) источника, закрытого для прямой радиовидимости, по пеленгам отраженных лучей при известных углах падения-отражения от объектов с учетом их угловых погрешностей и погрешностей оценки параметров модели (1).

Геометрическая модель СПМ закрытого источника радиоизлучений

На рис. 1 представлена геометрическая модель зоны формирования отраженных лучей закрытого ИРИ (в направлении прямой радиовидимости для ПРК) [3].

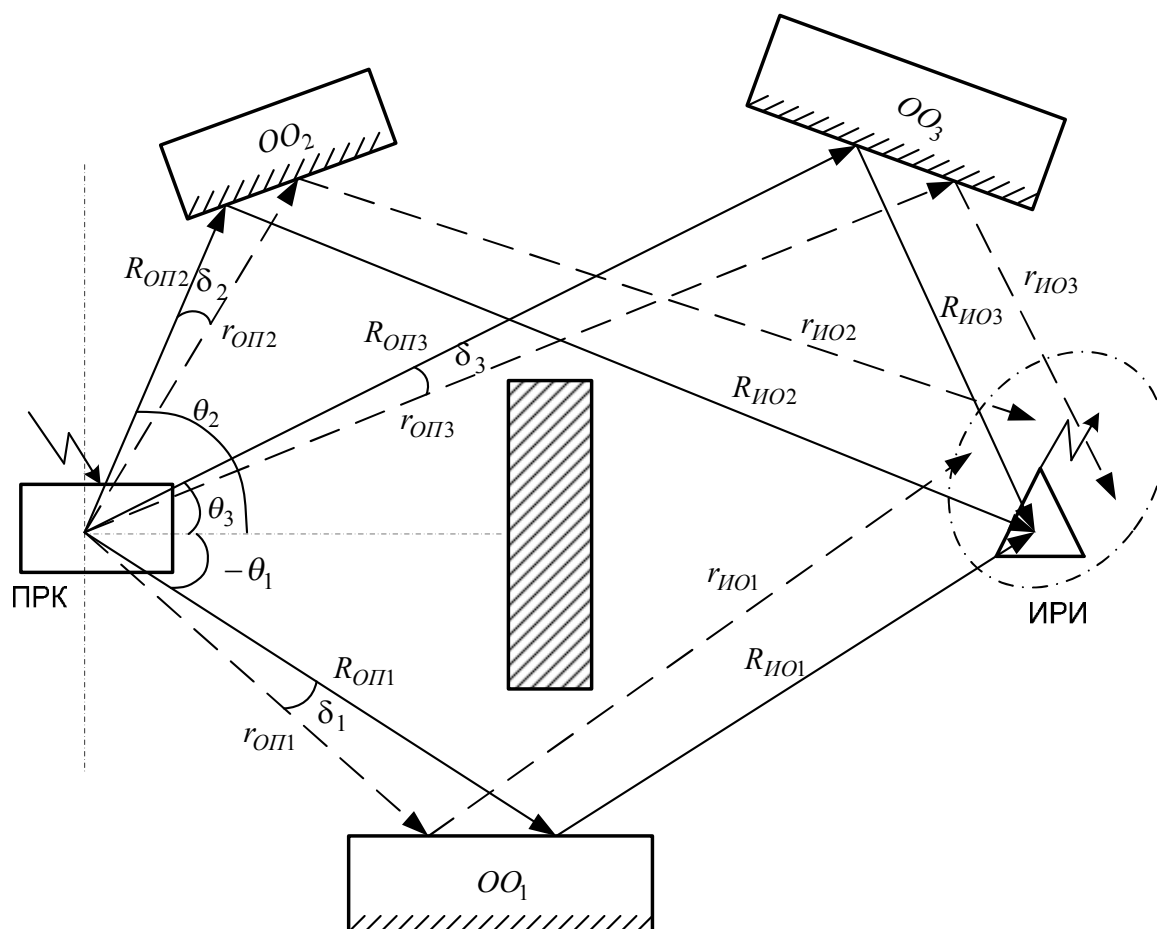


Рис. 1. Геометрическая модель СПИМ закрытого ИРИ

Здесь сплошными линиями указаны действительные направления прямых $R_{ИОj}$ и отраженных $R_{ОПj}$ лучей, а штриховыми линиями – ошибочные оценки направлений радиолучей (соответственно $r_{ИОj}$ и $r_{ОПj}$, где $j = 1, 2, 3$) вследствие угловых погрешностей δ_j радиопеленгов. Для наглядности стрелки расположены в направлениях, обратных фактическому прохождению радиолучей. В результате прокладки ошибочных пеленгов $\theta_j - \delta_j$ образовалась область неопределенности места расположения ИРИ.

Для определения наиболее вероятного местоположения ИРИ воспользуемся графоаналитическим методом расчета, иллюстрированным схемой отражения радиолучей от одного из отражающих объектов, например, $ОО_2$, представленной на рис. 2. Поместим начало прямоугольной системы координат xOy в точку расположения ПРК, ось Ox направим от ПРК к объекту, закрывающему ИРИ. По отношению к данной оси Ox фиксируется угол γ расположения отражающей поверхности. Предполагаем «зеркальность» отражающей поверхности, при которой выполняется равенство углов падения и отражения радиолуча.

В случае отсутствия погрешностей местоопределения ИРИ (в том числе и ошибки пеленга $\delta = 0$) координаты точки Q падения-отражения радиолуча определяются с помощью выражений:

$$x_0 = R_{ОП} \cos \theta; \quad y_0 = R_{ОП} \sin \theta. \quad (2)$$

Координаты точки S истинного расположения источника радиоизлучений (для данного объекта отражения):

$$x_{ИРИ} = R_{ОП} \cos \theta + R_{ИО} \sin(2\gamma + \theta - 3\pi/2); \quad (3)$$

$$y_{ИРИ} = R_{ОП} \sin \theta - R_{ИО} \cos(2\gamma + \theta - 3\pi/2). \quad (4)$$

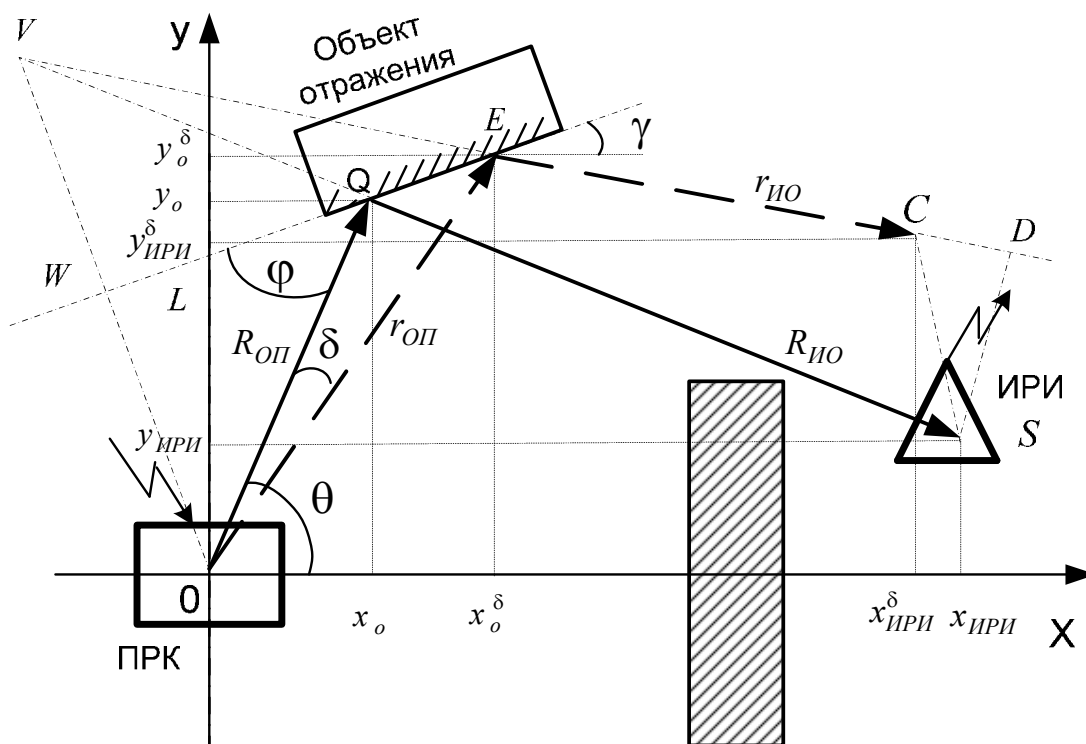


Рис. 2. Схема прохождения радиолучей при отражении от объекта

Расчет ошибки местоопределения ИРИ при учете погрешности пеленга

При наличии систематической ошибки пеленга, выраженной через угол δ , координаты точки E отражения радиолуча рассчитываются по формулам:

$$x_0^\delta = r_{OI} \cos(\theta - \delta) = R_{OI} \frac{\sin(\gamma + \theta) \cdot \cos(\theta - \delta)}{\sin(\pi - \delta - \gamma - \theta)}; \quad (5)$$

$$y_0^\delta = r_{OI} \sin(\theta - \delta) = R_{OI} \frac{\sin(\gamma + \theta) \cdot \sin(\theta - \delta)}{\sin(\pi - \delta - \gamma - \theta)}. \quad (6)$$

Координаты ошибочного местоопределения ИРИ вследствие наличия погрешности пленнга (координаты точки C) определяются по формулам:

$$x_{IPI}^{\delta} = R_{OI} \frac{\sin(\gamma + \theta) \cdot \cos(\theta - \delta)}{\sin(\pi - \delta - \gamma - \theta)} + R_{IO} \frac{\sin(\pi - \delta - \gamma - \theta)}{\sin(\gamma + \theta)} \sin(\delta + 2\gamma + 3\theta - 3\pi/2); \quad (7)$$

$$y_{IPH}^{\delta} = R_{OP} \frac{\sin(\gamma + \theta) \cdot \sin(\theta - \delta)}{\sin(\pi - \delta - \gamma - \theta)} - R_{HO} \frac{\sin(\pi - \delta - \gamma - \theta)}{\sin(\gamma + \theta)} \cos(\delta + 2\gamma + 3\theta - 3\pi/2). \quad (8)$$

Ошибку местоопределения ИРИ q можно представить как длину отрезка CS , являющегося гипотенузой треугольника с катетами $(x_{ИРИ} - x_{ИРИ}^{\delta})$ и $(y_{ИРИ} - y_{ИРИ}^{\delta})$. В данной работе предлагается более компактная модель расчета q , учитывающая вместо параметров θ и γ только угол φ отражения радиолуча от поверхности объекта.

Проведем зеркальное отображение точки расположения ПРК и отраженных лучей (от объекта отражения к ПРК) симметрично относительно плоскости отражающей поверхности (см. рисунок 2). В этом случае линией истинного пеленга является прямая, на котором откладываем отрезок $VS = R_{OP} + R_{IO}$, а прямая VC – линией ошибочного пеленга, на котором откладываем отрезок $VC = r_{OP} + r_{IO}$, выбираемый из условия (1), т. е. $r_{OP} \cdot r_{IO} = R_{OP} \cdot R_{IO}$. Требуется рассчитать расстояние q от точки S до точки C ошибочной оценки местоположения ИРИ.

Обозначим длину перпендикуляра из точки S до линии ошибочного пеленга VD , равную $SD = (R_{OP} + R_{IO}) \sin \delta$. Длина катета треугольника VDS равна $VD = (R_{OP} + R_{IO}) \cos \delta$. Следовательно, искомая величина q как гипотенуза ΔSCD определяется выражением:

$$q = \sqrt{(SD)^2 + (CD)^2} = \sqrt{(SD)^2 + (VD - VC)^2} = \left[(R_{OP} + R_{IO})^2 - 2(R_{OP} + R_{IO})(r_{OP} + r_{IO}) \cos \delta + (r_{OP} + r_{IO})^2 \right]^{1/2}. \quad (9)$$

Расстояние от ПРК до ОО и от ОО до ИРИ при наличии ошибки пеленга δ определяется соответствующими выражениями:

$$r_{OP} = VW / \cos(\pi/2 - \varphi - \delta) = R_{OP} \sin \varphi / \cos(\pi/2 - \varphi - \delta). \quad (10)$$

$$r_{IO} = R_{OP} \cdot R_{IO} / r_{OP} = R_{IO} \cos(\pi/2 - \varphi - \delta) / \sin \varphi. \quad (11)$$

Подставляя выражения (10) и (11) в формулу (9), получим обобщенное выражение для ошибки местоопределения ИРИ:

$$q = R_{OP} \left\{ \left(1 + \frac{R_{IO}}{R_{OP}} \right)^2 - 2 \left(1 + \frac{R_{IO}}{R_{OP}} \right) \left[\frac{\sin \varphi}{\cos(\pi/2 - \varphi - \delta)} + \frac{R_{IO}}{R_{OP}} \frac{\cos(\pi/2 - \varphi - \delta)}{\sin \varphi} \right] \cos \delta + \left[\frac{\sin \varphi}{\cos(\pi/2 - \varphi - \delta)} + \frac{R_{IO}}{R_{OP}} \frac{\cos(\pi/2 - \varphi - \delta)}{\sin \varphi} \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (12)$$

Расчет положения ИРИ с учетом погрешностей параметров модели

При наличии погрешностей в параметрах модели (1) местоположение ИРИ определяется не точками S и C (соответственно в случае отсутствия или наличия ошибки пеленга), а в результате пересечения линий пеленгов для различных объектов отражения OO_j , где $j = 1, 2, 3, \dots$ (см. рис. 1).

На рисунке 3 представлена графическая модель расчета расстояния между точками наиболее вероятного $Z(x, y)$ и ошибочного C местоположения ИРИ по одному отраженному радиолучу.

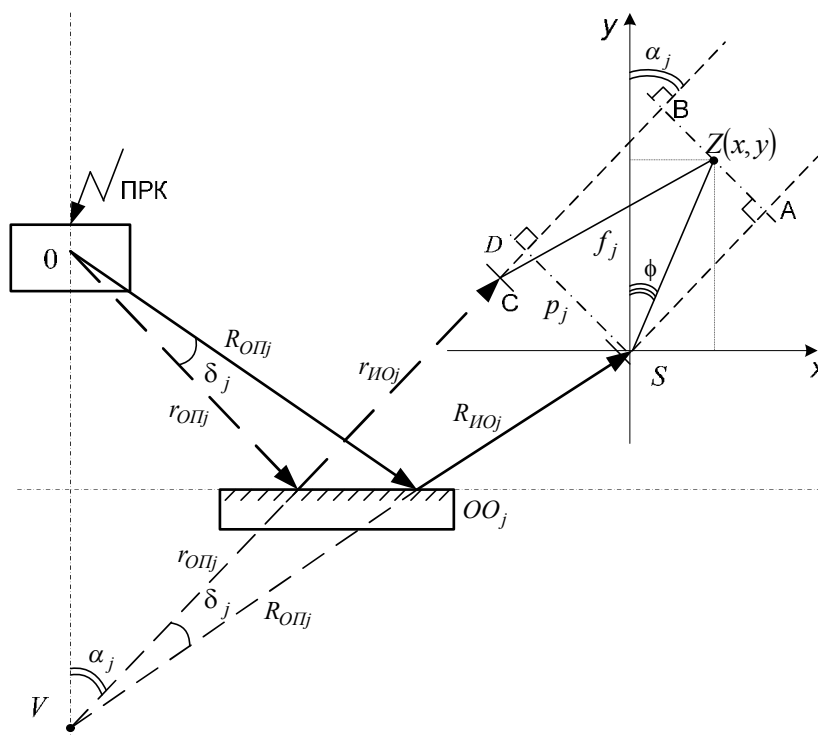


Рис. 3. Графическая модель расчета расстояния между точками наиболее вероятного $Z(x, y)$ и ошибочного C местоположения ИРИ

Пусть в результате прокладки линии пеленгов с учетом угловых погрешностей δ_j на карте за местоположение ИРИ принята точка Z с координатами (x, y) , находящаяся на расстоянии длины отрезка BZ от линии ошибочного пеленга. Из точки S проводим прямую SA , параллельную линии VB . В этом случае точка Z находится на одной из сторон прямоугольника $SDBA$, вторую сторону которого обозначим $SD = p_j$. Требуется рассчитать расстояние f_j от точки $Z(x, y)$ до точки C ошибочной оценки местоположения ИРИ.

Введя обозначения $\phi = \arctg(x/y)$, проведем расчет длины отрезка AS : $AS = SZ \cdot \sin(\alpha_j - \phi)$, где $SZ = \sqrt{x^2 + y^2}$. Тогда длина второго отрезка BZ одной из сторон прямоугольника равна:

$$BZ = AB - AZ = p_j - \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin(\alpha_j - \phi). \quad (13)$$

С учетом [4, формула 401.2] преобразуем выражение (13) к виду:

$$BZ = p_j + x \cos \alpha_j - y \sin \alpha_j. \quad (14)$$

Для определения расстояния ZC рассмотрим треугольник ΔCBZ . Длина отрезка CB состоит из суммы отрезков CD и DB , причем $CD = VD - VC = (R_{опj} + R_{иоj}) \cdot \cos \delta_j - (r_{опj} + r_{иоj})$. Стороны $DB = SA = SZ \cdot \cos(\alpha_j - \phi)$. По аналогии с преобразованием (13) – (14) $\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos(\alpha_j - \phi) = y \cos \alpha_j - x \sin \alpha_j$, тогда $CB = CD + DB = (R_{опj} + R_{иоj}) \cos \delta_j - (r_{опj} + r_{иоj}) + y \cos \alpha_j - x \sin \alpha_j$.

Искомое расстояние f_j равно: $f_j = \sqrt{(CB)^2 + (BZ)^2}$. С учетом обозначения $\rho_{\Sigma j} = (R_{опj} + R_{иоj}) \cdot \cos \delta_j - (r_{опj} + r_{иоj})$ определим величину f_j^2 :

$$\begin{aligned} f_j^2 &= (\rho_{\Sigma j} - x \sin \alpha_j + y \cos \alpha_j)^2 + (p_j + x \cos \alpha_j - y \sin \alpha_j + p_j)^2 = \\ &= \rho_{\Sigma j}^2 + p_j^2 + x^2 + y^2 - 4xy \cos \alpha_j \sin \alpha_j + \\ &+ 2x(p_j \cos \alpha_j - \rho_{\Sigma j} \sin \alpha_j) + 2y(\rho_{\Sigma j} \cos \alpha_j - p_j \sin \alpha_j). \end{aligned} \quad (15)$$

Вероятностная точечная оценка местоположения ИРИ

Предполагаем, что угловая погрешность δ_j радиопеленга является следствием воздействия многих дестабилизирующих факторов (интерференция радиоволн, ошибка оператора, колебания антенны ПРК и т. д.), что позволяет при вероятностном описании ее оценки использовать нормальный закон распределения случайной величины. Тогда вероятность того, что расстояние от точки Z до точки C ошибочной оценки местоположения ИРИ (по одному отраженному лучу) лежит в пределах между f_j и $f_j + df_j$ определяется формулой [5]:

$$W(f_j) dq_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_j (R_{опj} + R_{иоj})} \exp \left[-\frac{f_j^2}{2\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2} \right] df_j,$$

где σ_j – средняя квадратическая угловая ошибка j -го пеленга.

Аналогичные выражения можно написать и для других линий пеленгов. Суммарная вероятность того, что предполагаемое место нахождения ИРИ (точка Z) находится от n радиолучей, отраженных от объектов $ОО_1, ОО_2, \dots, ОО_n$ (см. рис. 1) на расстоянии от f_j до $f_j + df_j$, будет равна:

$$W(f_1, f_2, \dots, f_n) df_1 df_2 \dots df_n = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \prod_{j=1}^n \sigma_j (R_{опj} + R_{иоj})} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{f_j^2}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2} \right]. \quad (16)$$

Для определения координат (x_Z, y_Z) наиболее вероятного местоположения источника радиоизлучений (с учетом принципа наименьших квадратов) необходимо найти максимум выраже-

ния (16) либо минимум показателя степени $\exp[\cdot]$ в данном выражении. Найдем производные по x и y от показателя степени $\exp[\cdot]$ в (16) и приравняем их нулю:

$$x \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2} - 2y \sum_{j=1}^n \frac{\cos \alpha_j \cdot \sin \alpha_j}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2} + \sum_{j=1}^n \frac{p_j \cos \alpha_j - \rho_{\Sigma j} \sin \alpha_j}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2} = 0; \quad (17)$$

$$y \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2} - 2x \sum_{j=1}^n \frac{\cos \alpha_j \cdot \sin \alpha_j}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2} + \sum_{j=1}^n \frac{\rho_{\Sigma j} \cos \alpha_j - p_j \sin \alpha_j}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2} = 0. \quad (18)$$

Решая систему уравнений (17) – (18) относительно неизвестных переменных x и y , определяем координаты вероятнейшего местоположения источника радиоизлучений, закрытого для прямой радиовидимости с ПРК:

$$x_Z = (\gamma_1 \varepsilon + \gamma_2 \beta) / (\beta^2 - \varepsilon^2); \quad y_Z = (\gamma_1 \beta + \gamma_2 \varepsilon) / (\beta^2 - \varepsilon^2), \quad (19)$$

где

$$\gamma_1 = \sum_{j=1}^n \frac{p_j \cos \alpha_j - \rho_{\Sigma j} \sin \alpha_j}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2}; \quad \gamma_2 = \sum_{j=1}^n \frac{\rho_{\Sigma j} \cos \alpha_j - p_j \sin \alpha_j}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2};$$

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2}; \quad \beta = 2 \sum_{j=1}^n \frac{\cos \alpha_j \cdot \sin \alpha_j}{\sigma_j^2 (R_{опj} + R_{иоj})^2}. \quad (20)$$

Расчет области неопределенности местоположения ИРИ

Перенесем начало координат в точку (x_Z, y_Z) . Тогда вероятность нахождения ИРИ в любой точке с координатами (x, y) будет [6]:

$$W(x, y) dxdy = \left(\sqrt{\varepsilon^2 - \beta^2} / 2\pi \right) \cdot \exp \left[-0,5(\varepsilon x^2 - 2\beta xy + \varepsilon y^2) \right] dxdy. \quad (21)$$

Полагая, что показатель степени равен постоянной величине $-0,5\lambda^2$, получаем уравнение контура, на границах которого вероятность нахождения ИРИ в пределах элементарных площадок $dxdy$ имеет постоянную величину. С учетом введенного обозначения выражение $\varepsilon x^2 - 2\beta xy + \varepsilon y^2 = \lambda^2$ представляет собой уравнение эллипса с центром в точке (x_Z, y_Z) , размеры большой a_Z и малой b_Z полуосей которого равны:

$$a_Z = \lambda / \sqrt{\varepsilon - \beta}; \quad b_Z = \lambda / \sqrt{\varepsilon + \beta}. \quad (22)$$

Для определения интегральной вероятности P_9 нахождения ИРИ внутри эллипса, построенного по заданному значению λ , следует проинтегрировать выражение (21) в пределах площади эллипса Ω_9 :

$$P_9 = \int_{\Omega_9} \left\{ \left(\sqrt{\varepsilon^2 - \beta^2} / 2\pi \right) \cdot \exp \left[-0,5(\varepsilon x^2 - 2\beta xy + \varepsilon y^2) \right] \right\} dxdy. \quad (23)$$

Проведя замену переменных $x' = x/a_Z$ и $y' = y/b_Z$ и перейдя к полярным координатам κ и ψ [6]:

$$P_9 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\lambda} \exp(-0,5 \cdot \kappa^2) \kappa d\kappa = 1 - \exp(-0,5 \cdot \lambda^2), \quad (24)$$

где

$$\kappa^2 = (x')^2 + (y')^2; \quad \kappa d\kappa d\psi = dx' dy'; \quad \lambda = \sqrt{-2 \ln(1 - P_9)}.$$

Подставляя последнее выражение в (22), определяем площадь эллиптической области неопределенности местоположения закрытого ИРИ с учетом угловых погрешностей пеленгов отраженных радиолучей:

$$\Omega_9 = \pi \cdot a_Z b_Z = 2\pi \ln(1 - P_9) / \sqrt{\varepsilon^2 - \beta^2}, \quad (25)$$

где параметры ε и β определяются выражениями (20).

Таким образом, результатом моделирования области неопределенности местоположения ИРИ в случае нормального закона распределения угловых погрешностей пеленгов отраженных

радиолучей является эллиптическая поверхность, центр которой определяется координатами (19), а размеры – выражениями (22), (25) при заданных доверительной вероятности P_j и дисперсиях σ_j^2 угловых ошибок пеленгов.

Литература

1. Корниенко С. А., Сивакозов А. И., Федоренко В. В. Решение задачи радиоконтроля на основе использования методов планиметрии // Известия Института инженерной физики. 2007. № 1. С. 16–18.
2. Сивакозов А. И., Федоренко Н. В. Математическое моделирование зон формирования отраженных лучей в задаче пеленгации закрытых источников излучения радиосигналов // Информационные технологии моделирования и управления. 2006. № 9. С. 1141–1146.
3. Сивакозов А. И. Моделирование области неопределенности местоположения источника радиоизлучений с учетом угловых погрешностей пеленгов отраженных радиолучей // Информационные технологии моделирования и управления. 2007. № 2. С. 221–227.
4. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1977. 224 с.
5. Кукес И. С., Старик М. Е. Основы радиопеленгации. М.: Сов. радио, 1964. 640 с.
6. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высш. шк., 2000. 480 с.

УДК 658:007

**Яковлев Сергей Владимирович, Дерябина Светлана Евгеньевна,
Ильасова Марина Васильевна**

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ИНЦИДЕНТАМИ УСЛУГ СВЯЗИ

Разработана имитационная модель процессов управления инцидентами услуг связи на базе методологии цветных сетей Петри в среде CPN Tools.

Ключевые слова: компания связи, услуга, ITSM, ITIL, бизнес-процесс, имитационная модель, CPN Tools, пространство состояний, маркировка.

Yakovlev Sergei Vladimirovich, Derjabina Svetlana Evgen'evna, Il'jasova Marina Vasil'evna
**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESSES
OF INCIDENT MANAGEMENT COMMUNICATIONS SERVICES**

The simulation model of administrative processes by incidents of communication services on the basis of methodology of color Petri nets in the environment of CPN Tools is developed.

Keywords: communication company, service, ITSM, ITIL, business process, simulation model, CPN Tools, state space, marking.

Введение. В последние годы среди российских компаний наблюдается все больший рост популярности сервис-ориентированных подходов к управлению информационными технологиями (ИТ). Данный подход к управлению и организации ИТ-услуг, направленный на удовлетворение потребностей бизнеса, регулируется по средствам ITSM (Information Technology Service Management). Для содействия реализации подхода к управлению ИТ-услугами используются библиотека передового опыта организации ИТ – ITIL (IT Infrastructure Library), пакет открытых документов CobiT (Control Objectives for Information and Related Technology – задачи информационных и смежных технологий) и ряд других стандартов и методологий, отраженных на рис. 1 [1].

Процесс управления инцидентами считается одним из базовых процессов, обеспечивающих поддержку и предоставление ИТ сервисов. Целью процесса управления инцидентами является скорейшее восстановление нормального функционирования сервиса в соответствии с соглашением об уровне услуг и минимизация воздействия отказа на жизнедеятельность бизнеса.