

УДК 621.396.969.18

Т. П. Потапова, Н. В. Топорков,
Ю. М. Шабатура

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ФАЗОВО-ВРЕМЕННОЙ СИГНАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ ДВУХ ПРИЕМНЫХ МОДУЛЕЙ

Предложен алгоритм высокоточного определения координат источников радиоизлучения, основанный на совместной обработке разностно-временных и разностно-фазовых измерений сигналов от двух разнесенных приемников, расположенных на одном летательном аппарате. Осуществлена достоверная оценка достигаемой точности определения координат.

E-mail: ntoporkov@yandex.ru

Ключевые слова: координаты источника радиоизлучения, точность измерений, разностно-временные и разностно-фазовые измерения, неоднозначность фазовых измерений, совместная обработка.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) координат источников радиоизлучения (ИРИ), измеряемых с летательных аппаратов (ЛА), становится одним из основных технических параметров перспективных авиационных комплексов. Предложенный в работе [1] математический аппарат позволяет получить эффективные (по критерию Крамера–Рао) оценки координат ИРИ с ЛА, на котором установлены многоэлементные приемные модули. Выборки радиосигналов ИРИ, принимаемых всеми этими модулями в различных точках траектории полета ЛА, запоминаются и обрабатываются совместно, без промежуточного вычисления пеленга ИРИ в точках приема, что позволяет определять такую процедуру измерения координат как одноэтапную. Основным достоинством указанного подхода является снижение вероятности аномально больших ошибок определения координат ИРИ при малых (менее единицы) соотношениях сигнал/шум, что несомненно важно для специализированных ЛА, предназначенных для мониторинга радиотехнической обстановки в заданном районе, хотя требования к информационным ресурсам аппаратуры РТР при этом оказываются высокими (особенно в напряженной радиотехнической обстановке), а получение информации об окружающих ИРИ осуществляется с задержкой. В то же время для большинства неспециализированных

ЛА требуется быстрая текущая оценка пеленга и координат окружающих ИРИ, получаемая с использованием малогабаритной аппаратуры РТР, в качестве которой все чаще используется широкополосная двух-элементная приемная аппаратура с максимально разнесенными приемными модулями, реализующая разностно-временную пеленгацию обнаруженных радиосигналов. В настоящей работе рассматривается возможность значительного улучшения точности определения координат ИРИ с ЛА, оснащенных указанной приемной аппаратурой, за счет совместной обработки результатов разностно-временных измерений, принимаемых двумя максимально разнесенными приемными модулями сигналов с неоднозначными по пространству разностно-фазовыми измерениями.

Прямое использование разностно-временных измерений для обеспечения однозначности разностно-фазовых измерений возможно только при приеме сигналов от мощных ИРИ с близких расстояний. Так, в случае эффективного измерения разности времен приема сигналов с прямоугольными огибающими (по их передним фронтам) СКО измерения разности времен приема составит величину $\sigma_\tau \geq \frac{1}{\sqrt{2Wq}}$, где W — полоса пропускания приемника, q — отношение сигнал/шум (ОСШ) (по напряжению) на входе измерителя [2]. Чтобы сектор однозначности разностно-фазового метода определения пеленга в 4 раза превышал СКО определения пеленга разностно-временным методом, необходимо выполнение условия $q > \frac{4c}{\sqrt{2W\lambda}}$, где c — скорость света, λ — длина волны излучения ИРИ. При $W = 30$ МГц и $\lambda = 3$ см значение q , обеспечивающее однозначное измерение пеленга, превысит 59 дБ. В то же время для значений q , близких к 20 дБ, коэффициент неоднозначности будет близок к 10. Повышение точности определения координат можно обеспечить путем обработки данных подвижного пеленгатора в процессе его перемещения [3]. Однако известные алгоритмы обработки для двухэлементной разнесенной системы не позволяют решить задачу обеспечения однозначности в масштабе времени, близком к реальному.

Разработка искомого алгоритма определения координат ИРИ на основе совместной обработки разностно-временных и разностно-фазовых измерений сигнала осуществлялась с использованием имитационного моделирования. Входные данные обеспечил банк экспериментальных данных, полученных в результате натурального эксперимента по оцифровке принимаемых двумя типовыми приемными каналами радиотехнических сигналов, различающихся уровнем мощности, направлением приема и крутизной переднего фронта.

Основные принципы построения алгоритма высокоточного определения координат ИРИ вследствие совместного использования разностно-временных и разностно-фазовых измерений описаны в работах [4, 5] и заключаются в следующем: на траектории движения ЛА выбирают точки (например, через заданный интервал расстояния пролета), в которых, исходя из измеренной разностно-временной и разностно-фазовой информации, определяют наиболее вероятные неоднозначные направления на ИРИ (определенные разностно-фазовым методом) и вычисляют все возможные точки пересечения этих направлений. На разведываемом участке поверхности задается координатная сетка с определенным шагом по осям X и Y и вычисляется двумерный массив, каждый элемент которого содержит оценку вероятности нахождения ИРИ в данном пространственном прямоугольнике как отношение числа попавших в него точек пересечения к общему числу полученных точек. Для элемента сетки, в котором с максимальной вероятностью находится ИРИ, и его ближайшего окружения задается более мелкая пространственная сетка, на которой вновь формируется соответствующий двумерный массив оценок вероятностей нахождения ИРИ. Повторяя процедуры нахождения максимального элемента массива вероятностей и построения нового массива для пространственной сетки с меньшим шагом до достижения необходимой точности измерения, получаем оценку координат ИРИ на текущем этапе полета с пространственным дискретом, соответствующим самой мелкой пространственной сетке.

Проведенный анализ показал, что подобный алгоритм позволяет достаточно точно определить координаты ИРИ, но его реализация сопряжена с довольно большим числом вычислений в случаях, когда ОСШ на входе измерителя мало. В этом случае СКО определения пеленга разностно-временным методом во много раз превышает сектор однозначного определения пеленга разностно-фазовым методом, и мы будем иметь большое число возможных направлений на ИРИ и, следовательно, точек пересечения.

Необходимость оптимизации данного алгоритма привела к исследованию возможности накопления разностно-временных измерений во время полета ЛА для уменьшения окна выборки данных разностно-фазовой пеленгации. В результате моделирования было определено, что использование наилучшего среднеквадратического приближения для аппроксимации зависимости разностно-временного пеленга ИРИ от пройденного ЛА расстояния позволяет существенно снизить СКО измерения пеленга разностно-временным методом. Измерениям, полученным при хорошем ОСШ, приписывается больший вес, что позволяет существенно сузить диапазон неоднозначности для данных на протяжении всего полета.

Формализованная запись алгоритма оценки координат ИРИ может быть представлена в следующем виде:

$$(X_{\text{ИРИ}}, Y_{\text{ИРИ}}) = F(U_1, U_2, Q, \alpha_\tau, \varphi, W, T, L, f_{\text{норм}}),$$

где $(X_{\text{ИРИ}}, Y_{\text{ИРИ}})$ — вектор оценок координат ИРИ, полученный в данной точке траектории; U_1 и U_2 — N -мерные векторы комплексных отсчетов радиоимпульсов сигналов, принятых первым и вторым приемными каналами в данной точке траектории полета, $\{u_i^{(n)}, i = \overline{1, N}, n = \overline{1, 2}\}$; Q — вектор навигационной информации $\{q_n = (x_n, y_n), n = \overline{1, N_q}\}$, содержащий координаты точек траектории, где проводились измерения; α_τ — вектор $\{\hat{\alpha}_{\tau_n}, n = \overline{1, N_q}\}$ оценок разностно-временных пеленгов ИРИ, определенных для каждой из N_q точек траектории, где проводились вычисления; φ — вектор $\{\hat{\varphi}_n, n = \overline{1, N_q}\}$ оценок разности фаз принятых сигналов; W — вектор характеристик аппаратуры НРТР; T — вектор параметров атмосферных влияний; L — вектор порогов; $f_{\text{норм}}$ — функционал нормирования сигнала.

Вычисление координат ИРИ предполагает выполнение нескольких этапов.

Первый этап — на основе N -мерных векторов U_1 и U_2 комплексных отсчетов сигналов, принятых двумя разнесенными приемными каналами в данной точке траектории, вычисляются N -мерные векторы отсчетов огибающих этих сигналов A_1 и A_2 и осуществляется их нормирование с помощью метода $f_{\text{норм}}$. Далее по нормированным векторам B_1 и B_2 определяется вектор I моментов времени превышения передними фронтами сигналов порогов $L_{\text{н}}$, $L_{\text{в}}$, заданных вектором L , по следующим правилам:

$$\begin{aligned} I_{\text{н}}^{(n)} &= \arg_{i \in [1, N-1]} (b_i^{(n)} \leq L_{\text{н}}) \cap (b_{i+1}^{(n)} > L_{\text{н}}), \quad n = 1, 2; \\ I_{\text{в1}}^{(n)} &= \arg_{i \in [1, N-1]} (b_i^{(n)} \leq L_{\text{в}}) \cap (b_{i+1}^{(n)} > L_{\text{в}}), \quad n = 1, 2, \end{aligned} \quad (1)$$

и моментов времени, когда задние фронты импульсов опускаются ниже уровня, заданного порогом $L_{\text{в}}$, определяя тем самым плоскую часть импульса

$$I_{\text{в2}}^{(n)} = \arg_{i \in [1, N-1]} (b_i^{(n)} \geq L_{\text{в}}) \cap (b_{i+1}^{(n)} < L_{\text{в}}), \quad n = 1, 2. \quad (2)$$

Второй этап — вычисление оценки $\hat{\tau}$ разности времен прихода двух принятых сигналов

$$\hat{\tau} = F_\tau(B_1, B_2, L, I)$$

и оценки $\hat{\varphi}$ их разности фаз

$$\hat{\varphi} = F_\varphi(B_1, B_2, L, I).$$

Определим вид этих функционалов.

Пусть $A(t)$ — огибающая сигнала, принятого первым приемным каналом, нормированная к единице и ограниченная уровнями L_H и L_B . Тогда $A(t - \tau)$ — огибающая сигнала, принятого вторым приемным каналом, задержанная на время τ , которое и определяет разность времен прихода. Очевидно тождество

$$\frac{1}{L_B - L_H} \int_{t_1}^{t_2} (A(t) - A(t - \tau)) dt \equiv \tau,$$

где t_1 — начало импульса первого сигнала; t_2 — окончание переднего фронта импульса второго сигнала.

На основе этого тождества можно записать выражение для оценки разности времен прихода $\hat{\tau}$ двух дискретных сигналов с учетом того, что моменты начала и окончания переднего фронта импульса каждого из сигналов определяются по превышению заданных порогов (1):

$$\hat{\tau} = \Delta t \left[\frac{\sum_{i=I_H^{(1)}}^{I_{B1}^{(1)}} (b_i^{(1)} - L_H) - \sum_{i=I_H^{(2)}}^{I_{B1}^{(2)}} (b_i^{(2)} - L_H)}{L_B - L_H} + I_{B1}^{(2)} - I_{B1}^{(1)} \right],$$

где Δt — шаг дискретизации сигнала.

Разность фаз двух дискретных комплексных сигналов можно определить как аргумент частного от деления двух комплексных чисел ($k - x$ отсчетов первого и второго сигналов) $u_k^{(1)} = (x_k^{(1)}, y_k^{(1)})$ и $u_k^{(2)} = (x_k^{(2)}, y_k^{(2)})$, $k = \overline{1, N}$:

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{x_k^{(2)} + iy_k^{(2)}}{x_k^{(1)} + iy_k^{(1)}} = \operatorname{arctg} \frac{x_k^{(1)} y_k^{(2)} - x_k^{(2)} y_k^{(1)}}{x_k^{(1)} x_k^{(2)} + y_k^{(1)} y_k^{(2)}}.$$

Исходя из этого, в качестве оценки разности фаз $\hat{\varphi}$ можно принять среднее по плоской верхней части обоих радиоимпульсов:

$$\hat{\varphi} = \frac{1}{I_{B2} - I_{B1} + 1} \sum_{k=I_{B1}}^{I_{B2}} \varphi_k,$$

где $I_{B1} = \max_{n=1,2} I_{B1}^{(n)}$, $I_{B2} = \min_{n=1,2} I_{B2}^{(n)}$.

Таким образом, на выходе второго этапа имеются вычисленные значения разности времен прихода и разности фаз двух сигналов.

Третий этап — проводятся вычисления:

пеленга в текущей точке траектории на основе полученных разностно-временных данных по формуле $\hat{\alpha}_\tau = \arcsin \hat{\tau}c/d$, где c — скорость света, d — расстояние между приемными антеннами;

— вектора уточненных пеленгов $\alpha_\tau^* = \{\hat{\alpha}_{\tau_n^*}, n = \overline{1, N_q}\}$ для каждой точки траектории, где проводились измерения, с использованием аппроксимации зависимости пеленга от расстояния пролета;

— набора возможных направлений на ИРИ для каждой точки траектории, где выполнялись измерения, на основе измеренной разности фаз с учетом неоднозначности определения полной разности фаз:

$$\left\{ \hat{\alpha}_{\varphi_k}^{(n)} = \arcsin \frac{\lambda(\hat{\varphi}_n \pm 2\pi k)}{2\pi d}, k = 0, 1, 2, \dots, n = \overline{1, N_q}, \right. \\ \left. \hat{\alpha}_{\varphi_k}^{(n)} \in [\hat{\alpha}_{\tau_n^*} - 4\sigma_\alpha^\tau, \hat{\alpha}_{\tau_n^*} + 4\sigma_\alpha^\tau] \right\},$$

где λ — длина волны сигнала, σ_α^τ — СКО ошибки определения пеленга разностно-временным методом, оцененное в процессе имитационного моделирования на основе данных натурального эксперимента, уменьшенное в \sqrt{n} раз, где n — номер текущей точки траектории.

Таким образом, в результате вычислений формируется вектор из наборов $\alpha_\varphi : \{\alpha_\varphi^{(n)} = \{\hat{\alpha}_{\varphi_k}^{(n)}\}, k = \overline{0, M_n}, n = \overline{1, N_q}\}$ возможных направлений на ИРИ из каждой точки траектории.

Четвертый этап — определение всех возможных точек пересечения полученных направлений на ИРИ, и последовательное построение массивов оценок вероятностей нахождения ИРИ по всем полученным точкам пересечения с различным шагом по пространству:

1) набор точек пересечения $\{P\} = F_{xy}(\alpha_\varphi, Q)$, $p_i = (x_i, y_i)$, $i = \overline{1, N_s}$, где α_φ — вектор из наборов возможных направлений на ИРИ, определенных для каждой из N_q точек траектории; Q — вектор навигационной информации; N_s — число полученных точек пересечений;

2) массив оценок вероятностей, построенный для сетки G_Δ с шагом по координатам $\Delta = (\Delta_x, \Delta_y)$, имеет вид $H_\Delta = F_h(\{P\}, G_\Delta)$, где $G_\Delta(x_0, y_0, N_x, N_y) = \{g_{ij} = (x_i, y_j), x_i = x_0 + i\Delta_x, y_j = y_0 + j\Delta_y, i = \overline{0, N_x}, j = \overline{0, N_y}\}$ — сетка по пространству с началом в точке (x_0, y_0) , шагом по оси X — Δ_x и по оси y — Δ_y , протяженностью по оси X , равной $\Delta_x N_x$, и по оси Y — $\Delta_y N_y$. При последовательном построении вероятностных массивов, начало сетки для каждого следующего массива $H_{\Delta_{n+1}}^{(n+1)}$ рассчитывается по правилу:

$$\left\{ \begin{aligned} (i_{\max}^{(n)}, j_{\max}^{(n)}) &= \arg \max_{\substack{i=1, N_x^{(n)} \\ j=1, N_y^{(n)}}} h_{ij}^{(n)}, \quad x_0^{(n+1)} = x_0^{(n)} + (i_{\max}^{(n)} - 1)\Delta_x^{(n)}, \\ y_0^{(n+1)} &= y_0^{(n)} + (j_{\max}^{(n)} - 1)\Delta_y^{(n)} \end{aligned} \right\};$$

после этого шаг сетки уменьшается на порядок и определяются значения $N_x^{(n+1)} = \frac{3 \cdot \Delta_x^{(n)}}{\Delta_x^{(n+1)}}$ и $N_y^{(n+1)} = \frac{3 \cdot \Delta_y^{(n)}}{\Delta_y^{(n+1)}}$;

3) результирующие значения координат ИРИ определяются по максимальному элементу вероятностного массива $H_{\Delta_K}^{(K)}$, построенного для сетки с наименьшим шагом, по формулам

$$X_{\text{ИРИ}} = x_0^{(K)} + i_{\max}^{(K)}\Delta_x^{(K)}, \quad Y_{\text{ИРИ}} = y_0^{(K)} + j_{\max}^{(K)}\Delta_y^{(K)}.$$

Достоверность моделирования алгоритма обработки измерений определяли, используя банк данных натурных экспериментов по распространению, приему и оцифровке реальных радиотехнических сигналов при детальном математическом моделировании распространения радиоволн в атмосфере, флуктуаций курса ЛА и ошибок дифференциального режима работы СНС при различных расстояниях до контрольно-корректирующих станций.

В моделируемых ситуациях предполагался прямолинейный полет ЛА вдоль оси X , а измеряемые ИРИ располагались в точках, отстоящих на расстояние 50 км по оси X и расстояния 20, 30 и 50 км по оси Y от точки начала полета.

На рис. 1 приведены полученные в результате натурно-модельных исследований зависимости СКО определения местоположения ИРИ, находящегося на расстоянии 20 км от линии движения ЛА, от пройденного ЛА расстояния. Штриховыми линиями показаны расчетные

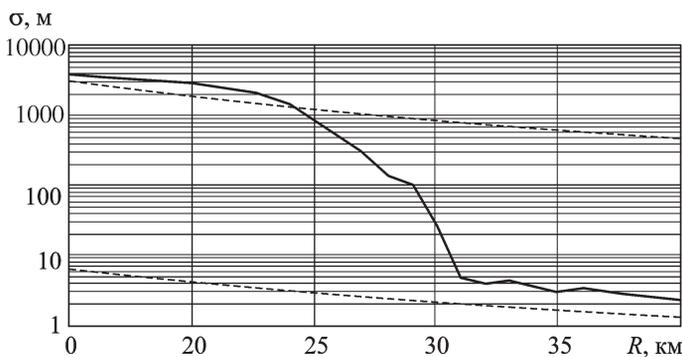


Рис. 1. Зависимости СКО определения местоположения ИРИ от пройденного ЛА расстояния

зависимости СКО измерения местоположения ИРИ при использовании только разностно-временных данных о пеленгах ИРИ (верхняя кривая) либо только разностно-фазовых измерений при устранении неоднозначности (нижняя кривая).

Как видно из приведенных зависимостей, для данного расположения ЛА и ИРИ при пролете первых 20 км происходит накопление информации и точность измерения координат не превышает точности, обеспечиваемой разностно-временным методом определения пеленга на ИРИ. Дальнейшее накопление данных и уточнение за счет этого разностно-временных измерений в интервале от 25 до 30 км пролета позволяет преодолеть неоднозначность разностно-фазовых измерений и осуществить переход к точности измерения местоположения ИРИ, обусловливаемой ошибкой разностно-фазового метода.

На рис. 2 приведены зависимости СКО измерения местоположения ИРИ, находящихся на различных расстояниях от траектории полета ЛА — 20, 25, 30 и 50 км, от пройденного ЛА расстояния R и от

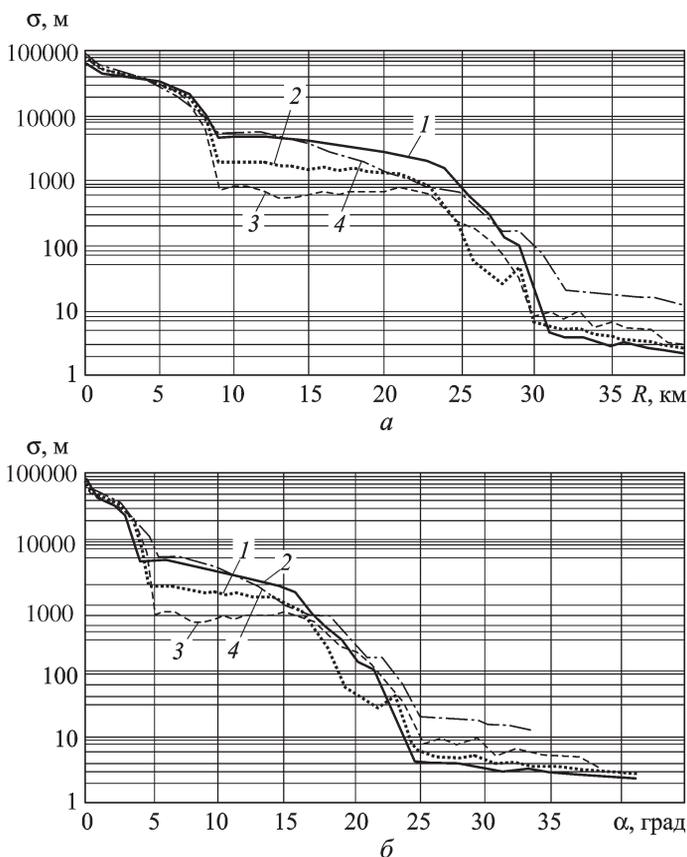


Рис. 2. Зависимости СКО измерения местоположения ИРИ от пройденного ЛА расстояния (а) и от изменения углового положения ИРИ (б) для ИРИ, находящихся на различных расстояниях от траектории полета ЛА:

1 — 20 км; 2 — 25 км; 3 — 30 км; 4 — 50 км

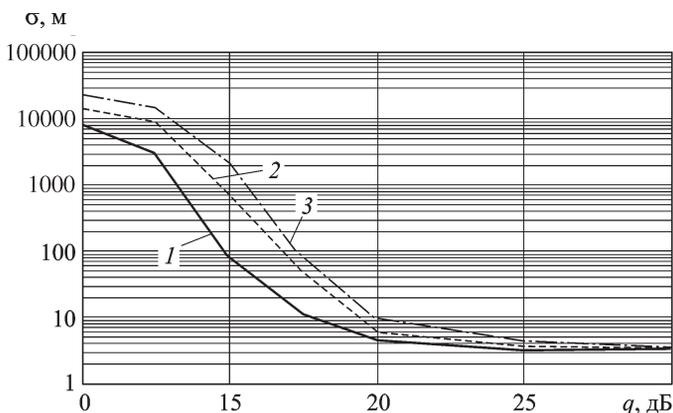


Рис. 3. Зависимости СКО измерения местоположения ИРИ от отношения сигнал/шум на входе для ИРИ, расположенных на расстояниях 20 (1), 30 (2) и 50 (3) км от траектории полета ЛА

изменения углового положения ИРИ α (при измерении на входе измерителя ОСШ равно 20 дБ).

Для всех вариантов удаления ИРИ от траектории полета ЛА для рассматриваемого алгоритма совместной обработки данных разностно-временных и разностно-фазовых измерений наблюдаются участки достижения предельных точностей определения координат ИРИ для текущей совокупности накопленных данных, при этом второй предельный уровень обусловлен СКО разностно-фазовых измерений. На рис. 3 приведены зависимости СКО измерения местоположения ИРИ от ОСШ на входе для ИРИ, расположенных на расстояниях 20, 30 и 50 км от траектории полета ЛА, при этом моделировался пролет на расстояние 40 км, а измерения выполнялись через 500 м.

Предел уменьшения СКО определения координат ИРИ для зависимостей (см. рис. 3) обусловлен ошибкой дифференциальной СНС при расстоянии до контрольно-корректирующей станции менее 100 км. В результате натурно-модельных исследований для типовых условий движения ЛА установлено, что при малом удалении ИРИ от траектории полета (20...30 км) совместная обработка по предложенному алгоритму данных разностно-временных и разностно-фазовых измерений, принятых двумя разнесенными приемными модулями сигналов ИРИ, позволит определить координаты ИРИ (изменение пеленга которого за время накопления информации составит порядка 40°) с СКО, близким к 10 м, при СКО позиционирования объекта не хуже 2 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д у б р о в и н А. В., С о с у л и н Ю. Г. Одноэтапное оценивание местоположения источника радиоизлучения пассивной системой, состоящей из узкобазовых подсистем // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49. № 2. – С. 156–170.

2. Бартон Д. Радиолокационные системы. – М.: Военное издательство МО СССР, 1967. – С. 363–375.
3. Мельников Ю. П., Попов С. В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. – М.: Радиотехника, 2008. – С. 14–22.
4. Топорков Н. В., Шабатура Ю. М. Исследование технических путей объединения разностно-временных и разностно-фазовых измерений пеленга в малогабаритном бортовом пеленгаторе // Материалы Всеросс. науч.-техн. шк.-семинара “Обработка, передача и отображение информации о быстропротекающих процессах”, 2008. – С. 494–497.
5. Бродский М. С., Топорков Н. В., Шабатура Ю. М., Шевчук В. И. Определение координат источников радиоизлучения с летательного аппарата с использованием двух разнесенных приемных модулей // Радиотехника. – 2009. – № 9. – С. 99–103.

Статья поступила в редакцию 3.12.09

Татьяна Петровна Потапова родилась в 1967 г., окончила Обнинский институт атомной энергетики в 1991 г. Ведущий конструктор Калужского научно-исследовательского радиотехнического института. Автор более 15 научных работ в области радиотехнической разведки и радиоэлектронного подавления.

T.P. Potapova (b. 1967) graduated from the Obninsk Institute for Atomic Power Engineering in 1991. Leading constructor of the Kaluga Research Institute of Radio Engineering. Author of more than 15 publications in the field of signal intelligence and radio jamming.

Никита Валентинович Топорков родился в 1952 г., окончил Московский энергетический институт в 1976 г. Канд. техн. наук, начальник отдела Калужского научно-исследовательского радиотехнического института. Автор более 40 научных работ в области радиотехнической разведки и радиоэлектронного подавления.

N.V. Toporkov (b. 1952) graduated from the Moscow Energy Institute in 1976. Ph. D., head of department of the Kaluga Research Institute of Radio Engineering. Author of more than 40 publications in the field of signal intelligence and radio jamming.

Юрий Михайлович Шабатура родился в 1951 г., окончил Рижское высшее военное инженерное авиационное училище, Военно-воздушную инженерную академию им. проф. Н.Е. Жуковского. Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Госкорпорации Ростехнологии ОАО “Концерн Радиоэлектронные технологии”. Автор более 80 научных работ в области радиотехнической разведки и радиоэлектронного подавления.

Yu.M. Shabatura (b. 1951) graduated from the Riga Higher Military Aviation School and the Zhukovsky Airforce Engineering Academy. D. Sc. (Eng.), leading researcher of the JSC “Kontsern “Radioelektronnye tekhnologii” of the state corporation “Rostekhnologii”. Author of more than 80 publications in the field of signal intelligence and radio jamming.