



УДК 621.396.96  
ГРНТИ 47.49.02

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕЛЕНГОВ И АМПЛИТУДЫ СИГНАЛОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

*Е.В. ИЛЬИНОВ, кандидат военных наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
М.П. БЕЛЯЕВ, кандидат технических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
В.А. УФАЕВ, доктор технических наук, старший научный сотрудник  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье приведены формулы расчёта потенциальной точности для пеленгов и логарифмов амплитуд, распределённых по нормальному закону, синтезированы алгоритмы максимального правдоподобия. Получено алгебраическое решение задачи комплексирования на основе гипотезы равенства измеренных и истинных значений пеленгов и амплитуды напряжённости поля, составления и решения системы линейных уравнений. Предложено введение весового коэффициента в уравнения для измерений пеленга. Неоднозначность алгебраического решения предложено разрешать сравнением значений функции максимального правдоподобия и выбором параметров, при которых достигается её максимум. Приведены результаты имитационного статистического моделирования алгебраических оценок и оценки максимального правдоподобия в сравнении с расчётами потенциальной точности.

*Ключевые слова:* излучатель, пеленг, амплитуда напряжённости электромагнитного поля, координаты, энергопотенциал, алгебраическое решение, оценка максимального правдоподобия, неоднозначность, имитационное статистическое моделирование, линейная ошибка.

## BEARINGS AND SIGNAL AMPLITUDES MEASUREMENTS INTEGRATION IN DETERMINING THE COORDINATES OF THE RADIATION SOURCE

*E.V. ILYINOV, Candidate of Military Sciences, Associate Professor  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
M.P. BELYAEV, Candidate of Technical sciences  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
V.A. UFAEV, Doctor of Technical sciences, Senior Researcher  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article presents formulas for calculating potential accuracy for bearings and logarithms of amplitudes distributed according to the normal law, and synthesizes maximum likelihood algorithms. An algebraic solution of the complexing problem is obtained on the equality hypothesis basis of the field strength bearings and amplitude measured and true values, as well as the formulation and solution of a linear equations system. The introduction of a weight coefficient into the equations for bearing measurements is proposed. The ambiguity of the algebraic solution is proposed to be resolved by comparing the values of the maximum likelihood function and selecting parameters at which its maximum is reached. The results of simulation statistical modeling of algebraic estimates and maximum likelihood estimates in comparison with calculations of potential accuracy are presented.

*Keywords:* emitter, bearing, amplitude of the electromagnetic field intensity, coordinates, energy potential, algebraic solution, maximum likelihood estimation, ambiguity, simulation statistical modeling, linear error.



**Введение.** Известны способы определения координат источника излучения, основанные на пеленговании [1] и измерении амплитуды напряжённости поля [2] в пространственно-разнесённых пунктах приёма. Задача состоит в получении оценок координат по совокупности этих измерений. Соответствующие оценки максимального правдоподобия получают путём максимизации двумерных функционалов численными методами. Для угломерных систем разработаны алгебраические решения [3], реализуемые с привлечением существенно меньших вычислительных ресурсов.

**Актуальность.** Одним из путей повышения эффективности таких систем является комплексирование информации, например, путём весового усреднения частных результатов, получаемых по пеленгам и амплитудам. В этом случае возникают методические трудности определения весовых коэффициентов. Альтернативное решение состоит в получении оценок непосредственно по совокупности измерений пеленгов и амплитуд, которые могут выполняться совместно [2]. Для этого могут быть использованы известные методы синтеза [1–3, 4] с необходимыми изменениями постановки задачи и моделей измерений.

Цель статьи – синтез и исследование алгоритмов определения координат источника излучения по совокупности измерений пеленгов и амплитуды сигналов.

Рассмотрим задачу определения местоположения источника излучения на плоскости с вектором декартовых координат  $(x, y)^T$  по результатам измерений пеленгов источника излучения  $\hat{\theta}_n$  и амплитуды напряжённости поля  $\hat{U}_n$  в пунктах приёма с известными координатами  $(X_n, Y_n)^T$ , где  $n = 0, \dots, N-1$  – номер пункта приёма при общем количестве  $N \geq 3$ ,  $T$  – знак транспонирования. Измерения могут выполняться синхронно группой стационарных пеленгаторов или поочерёдно, периодически в процессе движения мобильного пеленгатора. Истинные значения пеленгов равны

$$\theta_n(x, y) = \arg(\dot{r}_n(x, y)), \quad (1)$$

где  $\dot{r}_n(x, y) = (y - Y_n) + i \cdot (x - X_n)$  – вектор положения источника относительно  $n$ -го пункта приёма,  $\arg(\cdot)$  – фаза вектора, аргумент комплексного числа, заключённого в скобки,  $i$  – мнимая единица.

В соответствии с определением (1) отсчёт положительных значений пеленга выполняется от оси ординат по часовой стрелке.

Зависимость напряжённости поля источника от расстояния зададим в предположении известного параметра распространения  $\nu$ , так что истинные значения амплитуды равны

$$U_n(x, y, \mu) = \mu / r_n^\nu(x, y), \quad (2)$$

где  $\mu$  – энергетический параметр.

Для свободного пространства напряжённость поля обратно пропорциональна первой степени расстояния [5],  $\nu = 1$ ,  $\mu = \sqrt{60 \cdot P}$ , для излучателя, поднятого над земной поверхностью, зависимость квадратичная,  $\nu = 2$ ,  $\mu = \sqrt{60P} \cdot 4\pi \cdot H \cdot h / \lambda$ , где  $P$  – мощность излучения,  $H$ ,  $h$  – высота подъема антенн излучателя и пунктов приёма;  $\lambda$  – длина волны излучения.

Предполагается излучение и приём всенаправленными в горизонтальной плоскости антеннами, расположенными на одной высоте или выполнение калибровки результатов измерений амплитуды.

Примем, что измерения пеленга  $\hat{\theta}_n$  распределены по нормальному закону, независимые, несмещённые, равноточные, с одинаковым средним квадратическим отклонением  $\sigma_\theta$ .



Аналогично для логарифма измерений амплитуды  $\hat{u}_n = \ln(\hat{U}_n)$  со средним квадратическим отклонением  $\sigma_u$  и дополнительно нулевым средним значением. Такая модель учитывает инструментальные и эксплуатационные погрешности измерений, обусловленные в частности затенениями и переотражениями радиоволн от окружающих предметов.

Функция правдоподобия измеряемых параметров описывается многомерным нормальным законом распределения вида

$$P(x, y, \mu) = \frac{1}{\pi^N} \left( \frac{1}{2\sigma_\theta^2} \frac{1}{2\sigma_u^2} \right)^{0,5N} \times \exp \left( -\frac{1}{2\sigma_\theta^2} \sum_n (\hat{\theta}_n - \theta_n(x, y))^2 - \frac{1}{2\sigma_u^2} \sum_n (\hat{u}_n - u_n(x, y, \mu))^2 \right), \quad (3)$$

где  $u_n(x, y, \mu) = \ln(U_n(x, y, \mu))$ .

Разности пеленгов должны определяться с учётом области их определения  $[\pm\pi]$ , например векторным преобразованием  $\hat{\theta}_n - \theta_n(x, y) = \arg(\exp(i \cdot (\hat{\theta}_n - \theta_n(x, y))))$ .

Оценки параметров есть положение максимума функции правдоподобия. Выполняя максимизацию (3) первоначально по энергетическому параметру  $\mu$ , затем по координатам источника, получим искомые оценки максимального правдоподобия

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \max_{x, y} \left( \begin{array}{l} -\frac{1}{2\sigma_u^2} \left( \sum_n (\hat{u}_n - \ln(r_n^{-v}(x, y)))^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_n (\hat{u}_n - \ln(r_n^{-v}(x, y))) \right)^2 \right) - \\ -\frac{1}{2\sigma_\theta^2} \sum_n (\hat{\theta}_n - \theta_n(x, y))^2 \end{array} \right), \quad (4)$$

$$\ln(\hat{\mu}) = \frac{1}{N} \sum_n (\hat{u}_n - \ln(r_n^{-v}(\hat{x}, \hat{y}))). \quad (5)$$

Частными случаями решения (4) является раздельное [1, 2] оценивание по пеленгам и амплитудам с исключением верхней или нижней составляющей функционала в (4).

Если погрешности измерений пеленгов и амплитуды неизвестны (но постоянны), то дополнительная максимизация функции (3) по  $\sigma_\theta, \sigma_u$  даёт

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \arg \max_{x, y} \left( -\sum_n (\hat{\theta}_n - \theta_n(x, y))^2 \cdot \left( \sum_n (\hat{u}_n - \ln(r_n^{-v}(x, y)))^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_n (\hat{u}_n - \ln(r_n^{-v}(x, y))) \right)^2 \right) \right), \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_\theta^2 = \frac{1}{N} \sum_n (\hat{\theta}_n - \theta_n(\hat{x}, \hat{y}))^2, \quad \hat{\sigma}_u^2 = \frac{1}{N} \left( \sum_n (\hat{u}_n - \ln(r_n^{-v}(\hat{x}, \hat{y})))^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_n (\hat{u}_n - \ln(r_n^{-v}(\hat{x}, \hat{y}))) \right)^2 \right). \quad (7)$$

При этом энергетический параметр определяется формулой (5) с оценками координат в соответствии с (6).

Потенциальная точность оценок максимального правдоподобия (4) характеризуется корреляционной матрицей ошибок [6]

$$\mathbf{Q} = \mathbf{M}^{-1}, \quad (8)$$



где  $\mathbf{M} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x \partial x} p(x, y, \mu) & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} p(x, y, \mu) & \frac{\partial^2}{\partial x \partial \mu} p(x, y, \mu) \\ \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} p(x, y, \mu) & \frac{\partial^2}{\partial y \partial y} p(x, y, \mu) & \frac{\partial^2}{\partial y \partial \mu} p(x, y, \mu) \\ \frac{\partial^2}{\partial \mu \partial x} p(x, y, \mu) & \frac{\partial^2}{\partial \mu \partial y} p(x, y, \mu) & \frac{\partial^2}{\partial \mu \partial \mu} p(x, y, \mu) \end{pmatrix}$  – информационная матрица

Фишера,  $p(x, y, \mu) = \ln(P(x, y, \mu))$  – логарифм функции правдоподобия.

Дифференцирование в (8) выполняют в точке истинных значений параметров с предварительной заменой измерений истинными значениями. Из (6) следуют формулы расчёта средних квадратических отклонений  $\sigma_x = \sqrt{Q_{0,0}}$ ,  $\sigma_y = \sqrt{Q_{1,1}}$ ,  $\sigma_\mu = \sqrt{Q_{2,2}}$ , коэффициента корреляции  $\rho_{x,y} = Q_{0,1} / (\sigma_x \cdot \sigma_y)$ , линейной ошибки местоопределения  $\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ .

Потенциальные точности оценивания по измерениям амплитуды определяются по (8) исключением в (3) данных о пеленгах, а по измерениям пеленгов дополнительно снижается размерность информационной матрицы из-за отсутствия параметра  $\mu$ .

В оценках максимального правдоподобия необходима двухмерная максимизация с привлечением численных методов. Используя методические положения работ [3, 4], получим алгебраические решения поставленной задачи.

Исходное положение заключается в составлении системы уравнений путём приравнивания измеренных и истинных значений величин

$$\begin{cases} \hat{U}_n = \frac{\mu}{\left( (x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2 \right)^{v/2}}, \\ \operatorname{tg} \hat{\theta}_n = \frac{\sin \hat{\theta}_n}{\cos \hat{\theta}_n} = \frac{x - X_n}{y - Y_n}. \end{cases} \quad (9)$$

Следующий шаг состоит в представлении системы нелинейных уравнений (9) в виде системы линейных уравнений со средоточием нелинейной составляющей измерений в одной скалярной функции.

Для этого поместим центр системы координат в место расположения пункта приёма  $n = 0$ , тогда расстояние до него будет

$$r_0^2 = x^2 + y^2. \quad (10)$$

Первоначально примем, что  $r_0$  не зависит от координат излучателя, тогда после алгебраических преобразований (9) с учётом (10) получим

$$\begin{cases} 2 \cdot X_n \cdot \hat{U}'_n \cdot x + 2 \cdot Y_n \cdot \hat{U}'_n \cdot y + \mu' = (X_n^2 + Y_n^2) \cdot \hat{U}'_n - \hat{U}'_n \cdot r_0^2 \\ \cos \hat{\theta}_n \cdot W \cdot x - \sin \hat{\theta}_n \cdot W \cdot y = (\cos \hat{\theta}_n \cdot X_n - \sin \hat{\theta}_n \cdot Y_n) \cdot W \end{cases} \quad (11)$$

где  $\hat{U}'_n = (\hat{U}_n)^{2/v}$ ,  $\mu' = \mu^{2/v}$ ,  $W$  – весовой коэффициент.



Совокупность уравнений (11) образует линейную относительно неизвестных параметров  $\mathbf{Z} = (x, y, \mu')^T$  систему уравнений

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{B} - \widehat{\mathbf{U}}' \cdot r_0^2, \quad (12)$$

элементы матриц определяются по формулам

$$\begin{aligned} A_{n,0} &= 2 \cdot X_n \cdot \widehat{U}'_n, \quad A_{n,1} = 2 \cdot Y_n \cdot \widehat{U}'_n, \quad A_{n,2} = 1, \\ A_{n+N,0} &= \cos \theta_n \cdot W, \quad A_{n+N,1} = -\sin \theta_n \cdot W, \quad A_{n+N,2} = 0, \\ B_n &= (X_n^2 + Y_n^2) \cdot \widehat{U}'_n, \quad B_{n+N} = (\cos \widehat{\theta}_n \cdot X_n - \sin \widehat{\theta}_n \cdot Y_n) \cdot W, \quad \widehat{U}'_{n+N} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Матрица  $\mathbf{A}$  коэффициентов при неизвестных имеет размер  $2 \cdot N \times 3$ , матрицы коэффициентов свободных членов  $\mathbf{B}$ ,  $\widehat{\mathbf{U}}'$  состоят из одного столбца, размер  $2 \cdot N \times 1$ .

Система (12) является переопределённой, с числом уравнений большим, чем число неизвестных. Решая её в соответствии с [7], получим

$$\mathbf{Z} = \mathbf{C} + \mathbf{D} \cdot r_0^2. \quad (14)$$

Составные в (14) величины равны

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}^\perp \cdot \mathbf{B}, \quad (15)$$

$$\mathbf{D} = -\mathbf{A}^\perp \cdot \mathbf{U}'. \quad (16)$$

Псевдообращение выполняется путём матричного преобразования

$$\mathbf{A}^\perp = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T. \quad (17)$$

Для псевдообращения (17) необходима линейная независимость столбцов матрицы  $\mathbf{A}$ . Подстановкой в (12) значений координат из (14) приходим к квадратному относительно  $r_0^2$  уравнению

$$(C_0 + D_0 \cdot r_0^2)^2 + (C_1 + D_1 \cdot r_0^2)^2 = r_0^2. \quad (18)$$

Решая это уравнение, получим

$$r_0^2 = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (19)$$

где  $a = D_0^2 + D_1^2$ ,  $b = 2 \cdot (C_0 \cdot D_0 + C_1 \cdot D_1) + 1$ ,  $c = C_0^2 + C_1^2$ .

В завершении, подстановкой полученных (19) значений  $r_0^2$  в (14), находим оценки искомым параметров  $\widehat{\mathbf{Z}}$ . Ограничение на положение центра системы координат при этом снимется.



Таким образом, расчёт параметров происходит в следующей последовательности. Определяют (13) матрицы коэффициентов при неизвестных параметрах и свободных членах  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\hat{\mathbf{U}}'$ . По (15)-(17) находят матрицы  $\mathbf{C}, \mathbf{D}$ , а по (19) рассчитывают возможное удаление источника от центра системы координат. Для каждого из этих значений по формуле (14) рассчитывают искомые параметры  $\hat{\mathbf{Z}}^+, \hat{\mathbf{Z}}^-$ , соответствующие знакам плюс и минус перед радикалами в (19).

Полученное алгебраическое решение неоднозначно. Выбор предлагается выполнять по максимуму функции правдоподобия (3) среди пары полученных значений

$$\hat{\mathbf{Z}} = \begin{cases} \hat{\mathbf{Z}}^+, & \text{если } P(\hat{\mathbf{Z}}^+) > P(\hat{\mathbf{Z}}^-) \\ \hat{\mathbf{Z}}^-, & \text{иначе} \end{cases} \quad (20)$$

Предложенный принцип может быть использован и при разрешении неоднозначности алгебраических оценок в системах разностно-дальномерного типа.

Методической особенностью приведенного решения является введение весового коэффициента  $W$ . Внешне это парадоксально, ведь он очевидным образом сокращается в нижнем уравнении (11). Эффект проявляется в системе уравнений, данные о пеленгах и амплитудах некоторым образом ранжируются. Важно, что на весовой коэффициент умножаются строки матрицы  $\mathbf{A}$ , условие линейной независимости её столбцов, будучи изначально выполненным, не нарушается.

Исходя из общей идеи комплексирования, логично установить больший вес параметру, пеленгу или амплитуде, с меньшими погрешностями измерений

$$W = 1/(\sigma_\theta \cdot \rho)^p, \quad (21)$$

где  $\rho = 1/\sqrt{\exp(\sigma_u^2) - 1}$  – отношение сигнал/помеха.

Отношение сигнал/помеха определено как отношение среднего значения к среднему квадратическому отклонению измерений амплитуды. Учтено, что при нормальном распределении логарифма амплитуды, погрешности измерений амплитуды распределены по логарифмически нормальному закону с моментами распределения, взаимосвязанными с заданным значением  $\sigma_u$  согласно [8].

Показатель степени  $p$  в формуле (21) установлен по результатам моделирования. Методика состояла в следующем. Для системы из трёх пунктов приёма с эквидистантным расположением на окружности радиусом 5 км и источника излучения в её центре устанавливалась средняя квадратическая ошибка пеленгования 5 град и флуктуации амплитуды 1,5 дБ. При таких параметрах  $1/(\sigma_\theta \cdot \rho) \approx \sigma_u / \sigma_\theta \approx 2$ , погрешности раздельного оценивания координат одинаковы  $\sigma_r \approx 0,5$  км, потенциально достигается максимальный эффект от комплексирования. Изменением показателя степени определялось значение, при котором достигается минимум ошибок совместного алгебраического оценивания. Получено оптимальное значение  $p = 5$ , которое не зависит от состава системы, её радиуса, соотношения уровней погрешностей.

С учётом вычислительных затрат, комплексирование целесообразно при отношении погрешностей первичных измерений  $\sigma_u / \sigma_\theta$  вблизи двух. Иначе предпочтительнее оценивание только по амплитудам или пеленгам. Алгебраическое оценивание по амплитудам выполнимо с применением приведенных соотношений и снижением размерности матриц (13) до  $N$  строк.



Для угломерных систем дополнительно исключаются действия с отсутствующей (равной нулю) матрицей  $\mathbf{D}$ , в том числе решение квадратного уравнения (18), понижается размер единичной матрицы до  $2 \times 2$ .

Для оценки эффективности полученных алгоритмов выполнено имитационное статистическое моделирование. Исследовались зависимости линейной ошибки определения координат излучателя от дальности до центра системы по линиям симметрии: по прямой линии «центр-пункт приёма» рисунок 1а и от центра по срединной линии между пунктами приёма рисунок 1б.

Оценивание методом максимального правдоподобия выполнялось путём квантования области пространства с дискретностью 0,1 км в окрестности  $\pm 2$  км от места положения источника и повторным уточнением найденного положения максимума в пределах кванта. Относительно такого варианта алгебраическим способом с применением матричных операций Mathcad обеспечивается увеличение скорости расчётов примерно в 500 раз.

Для учёта возможного смещения оценок линейная ошибка определялась как среднее квадратичное соответствующей погрешности. Число статистических испытаний  $10^3$ .

Пунктирная нижняя линия на рисунке 1 – расчётная линейная ошибка, тонкая сплошная – ошибка максимального правдоподобия в точках экспериментов (кружки), толстая линия – ошибка алгебраического решения.

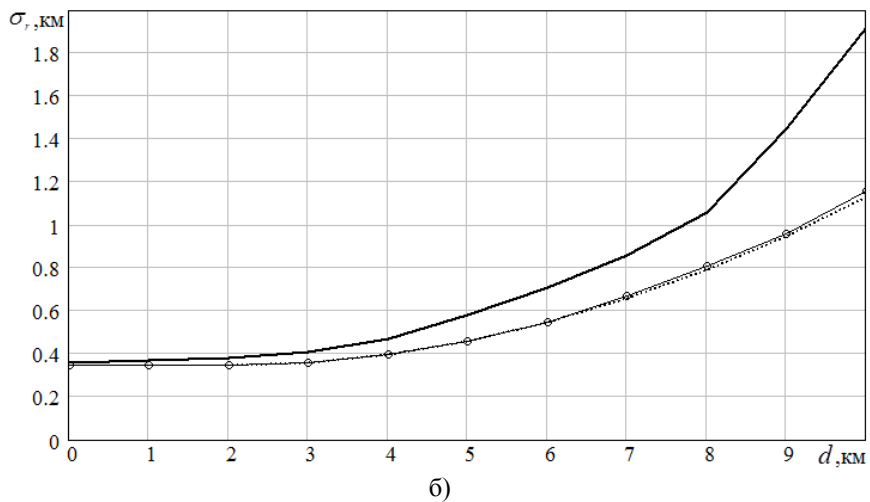
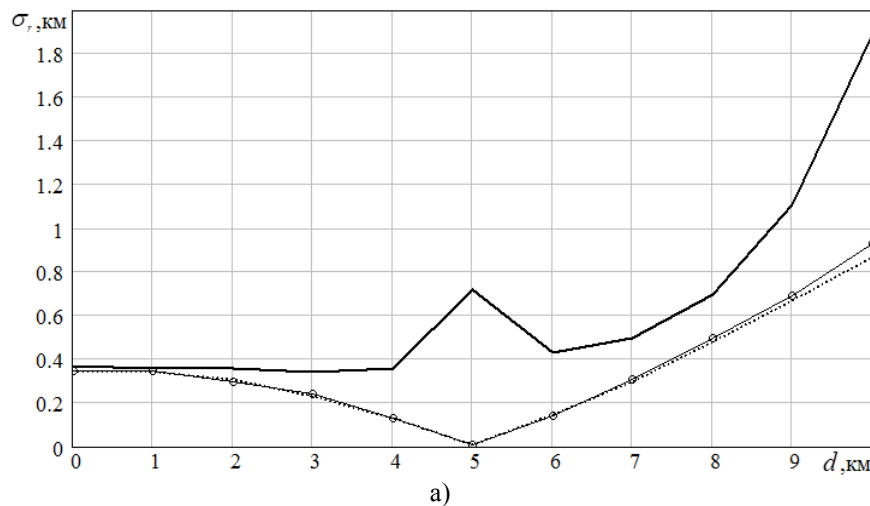


Рисунок 1 – Зависимости ошибок определения координат от дальности:  
 а) – в направлении пункта приёма, б) – по срединной линии



Результаты расчёта и оценивания методом максимального правдоподобия близки. Минимум ошибок определения координат достигается в месте положения пункта приёма (рисунок 1а). Для источника на срединной линии (рисунок 1б) ошибки монотонно возрастают по мере удаления источника от 0,35 км в центре системы, при этом комплексирование измерений обеспечивает снижение ошибок отдельных оценок в  $\sqrt{2}$  раз.

Погрешности алгебраического решения, примерно постоянные до дальности 4 км, резко возрастают вблизи пункта приёма на удалении 4–6 км (рисунок 1а). Основная причина этого заключается в аппроксимации в (9) луча пеленга прямой линией путём нелинейного преобразования тангенс. Для источника, расположенного на срединной линии (рисунок 1 б) и на линии центр-пункт приёма при дальности более 6 км ошибки увеличиваются монотонно с превышением потенциального предела примерно вдвое на удалении 10 км.

Особенности пространственного распределения алгебраических оценок координат иллюстрируются рисунком 2, где показано поле рассеивания для источника излучения на дальности 6 км. Расчётный эллипс ошибок определения координат, сплошная линия, построен на основе (8) для вероятности попадания в него оценок максимального правдоподобия 0,9.

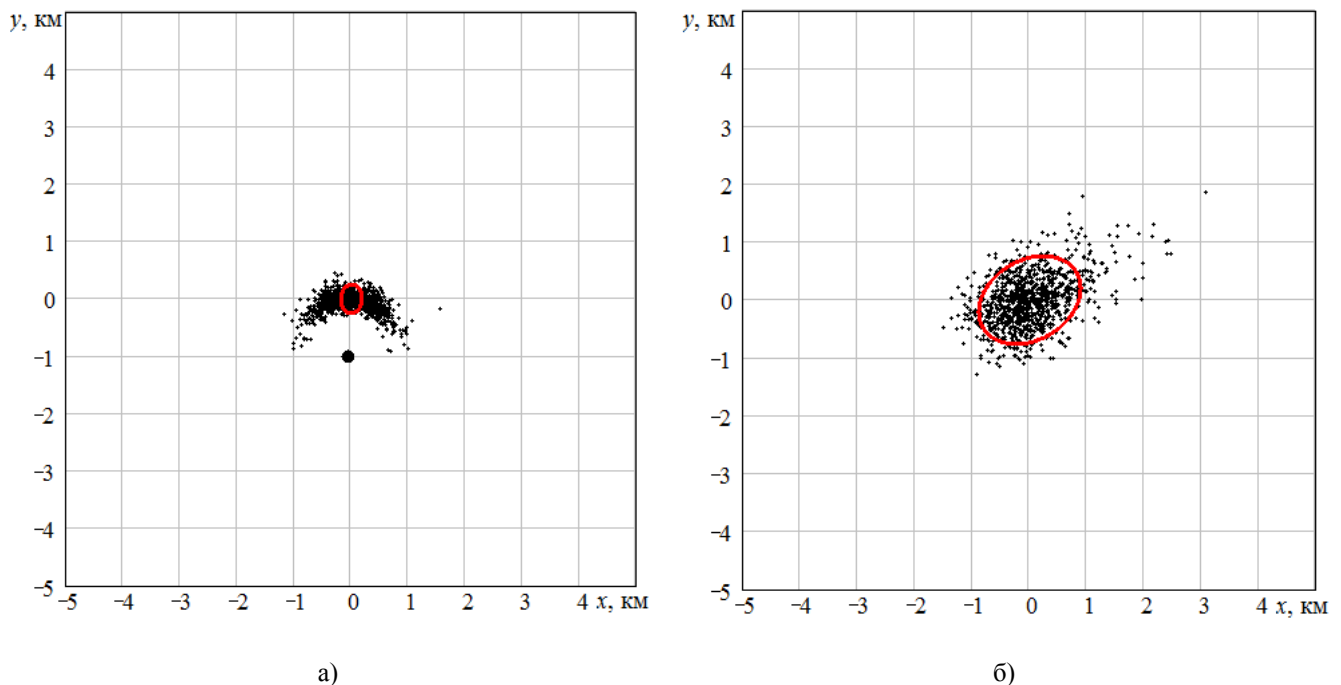


Рисунок 2 – Поле рассеивания алгебраических оценок координат источника излучения:  
 а) – вблизи пункта приёма, б) – между пунктами приёма

Для источника вблизи пункта приёма (рисунок 2а) характерно рассеивание по внешнему полукольцу, при расположении между пунктами приёма (рисунок 2б) наблюдается кометообразная асимметрия поля рассеивания со смещением оценок в область большей дальности.

**Выводы.** В заключение отметим следующее.

Определение координат источника излучения путём алгебраических преобразований, обеспечивая пятисоткратное увеличение скорости расчётов, сопровождается ухудшением точности.

Область их непосредственного предпочтительного применения – внутренняя часть системы, ограниченная радиусом около 4 км. Вне этой области алгебраические оценки целесообразно использовать для селекции источников по дальности или как первое приближение с последующим уточнением методом максимального правдоподобия.





СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабцун А.В. Оценка максимального правдоподобия координат источников сигналов при многопозиционном пеленговании. М.: Радиотехника, № 9, 1987. С. 9–10.
2. Уфаев В.А. Способы определения местоположения и пространственной идентификации источников радиоизлучений: Монография. Воронеж: Изд-во «Цифровая полиграфия», 2019. 430 с.
3. Булычев Ю.Г., Бурлай И.В., Крицкий Я.В. Комплексная оптимизация обработки измерений угломерных систем. М.: Радиотехника, № 4, 2002. С. 11–15.
4. Щербачёв В.А. Замкнутые решения при определении координат в распределённой разностно-дальномерной системе. М.: Радиотехника, № 4, 2013. С. 4–8.
5. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М.: Высш. школа, 1975. 280 с.
6. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигнала. М.: Сов. радио, 1970. 336 с.
7. Буков В.Н. Вложенные системы. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во научн. лит-ры Н.Ф. Бочкарёвой, 2006. 720 с.
8. Заездный А.М. Основы расчётов по статистической радиотехнике. М.: Связь, 1969. 447 с.

REFERENCES

1. Rabcun A.V. Ocenka maksimal'nogo pravdopodobiya koordinat istochnikov signalov pri mnogopozicionnom pelengovanii. M.: Radiotekhnika, № 9, 1987. pp. 9–10.
2. Ufaev V.A. Sposoby opredeleniya mestopolozheniya i prostranstvennoj identifikacii istochnikov radioizlucheniij: Monografiya. Voronezh: Izd-vo «Cifrovaya poligrafija», 2019. 430 p.
3. Bulychev Yu.G., Burlaj I.V., Krickij Ya.V. Kompleksnaya optimizaciya obrabotki izmerenij uglomernyh sistem. M.: Radiotekhnika, № 4, 2002. pp. 11–15.
4. Scherbachev V.A. Zamknutyte resheniya pri opredelenii koordinat v raspredelelennoj raznostno-dal'nomernoj sisteme. M.: Radiotekhnika, № 4, 2013. pp. 4–8.
5. Grudinskaya G.P. Rasprostranenie radiovoln. M.: Vyssh. shkola, 1975. 280 p.
6. Fal'kovich S.E. Ocenka parametrov signala. M.: Sov. radio, 1970. 336 p.
7. Bukov V.N. Vlozhennye sistemy. Analiticheskij podhod k analizu i sintezu matrichnyh sistem. Kaluga: Izd-vo nauchn. lit-ry N.F. Bochkarevoj, 2006. 720 p.
8. Zaezdnyj A.M. Osnovy raschetov po statisticheskoj radiotekhnike. M.: Svyaz', 1969. 447 p.

© Ильинов Е.В., Беляев М.П., Уфаев В.А., 2020

Ильинов Евгений Владимирович, кандидат военных наук, доцент, начальник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, dgon75@yandex.ru.

Беляев Максим Павлович, кандидат технических наук, начальник отдела научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, belyaev\_mp@mail.ru.

Уфаев Владимир Анатольевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, andreyuff@mail.ru.