

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-105-116

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОЛИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ, ПАРАЗИТИРУЮЩЕЙ НА ИЗЛУЧЕНИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Е.Г. БОРИСОВ¹

¹*Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия*

В настоящее время в районах крупных городов наблюдается устойчивая тенденция к увеличению пространственной плотности телекоммуникационных систем. Насыщенность радиоспектра аналоговыми и цифровыми системами, используемыми для решения задач радиосвязи и телевидения, позволяет на их основе совершенствовать технологии полуактивного радиолокационного обнаружения и определения координат воздушных объектов (ВО). Осуществление радиолокационного наблюдения с использованием передатчиков нерадиолокационного назначения часто называют полуактивной радиолокацией с использованием сторонних или «паразитных» источников излучения. Преимуществами систем являются минимизация затрат на развертывание, незначительные эксплуатационные энергозатраты, низкая вероятность постановки помех, скрытность факта работы, экологичность и отсутствие требований к выделению радиочастотного ресурса. Относительно большие высоты поднятия антенн связных и телевизионных передатчиков при существующей излученной мощности создают благоприятные условия для обнаружения маловысотных ВО. Цифровые сигналы современных телекоммуникационных систем имеют ширину спектра, обеспечивающую приемлемое разрешение и точность измерения суммарной дальности и угловых координат. В общем случае системы такого типа представляют собой полистатическую (многопозиционную) систему, состоящую из одного или нескольких источников излучения и одной или нескольких приемных позиций, разнесенных в пространстве. Перспективной задачей, решаемой такими системами наряду с контролем воздушного пространства, является управление воздушным движением (УВД). В работе рассмотрены варианты определения прямоугольных координат ВО в системе бистатических радиолокационных станций, использующих для обнаружения целей радиоизлучение сторонних источников. Рассмотрены варианты местоопределения воздушных объектов при различном составе первичных измерений координат и количестве передающих позиций. Приведены аналитические выражения для расчета проекций вектора скорости цели на оси декартовой системы координат. Произведена оценка точности определения местоположения воздушных объектов для многопозиционных радиосистем такого типа.

Ключевые слова: бистатическая локация, метод наименьших квадратов, суммарно-дальномерные, угломерные измерения, определение местоположения, точность, полуактивная радиолокация.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развернуты широкие исследования по использованию коммерческих передатчиков FM и DAB – радио, цифрового телевидения (форматов DVB-T, DVB-T2) и сигналов базовых станций сотовой связи для обнаружения воздушных объектов (ВО) [1–12]. В настоящее время такими фирмами, как Thales (Франция), Lockheed Martin (США), ERA (Чешская Республика), Leonardo (Италия)¹ и др., проводятся интенсивные исследования по разработке и проектированию радиолокационных комплексов, одновременно использующих несколько сторонних передатчиков различных диапазонов. По мнению разработчиков, создание маловысотного радиолокационного поля, дополняющего штатные средства радиолокационного наблюдения, существенно повысит достоверность и надежность радиолокационного наблюдения ВО в интересах УВД [8, 9]. В работе [3] описана экспериментальная бистатическая радио-

¹ Passive Coherent Locator History and Fundamentals [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sto.nato.int/publications/.../EN-SET-243-01.pdf> (дата обращения: 20.04.2018).

локационная система, которая обнаруживает и отслеживает цели на дальностях более 150 км от приемника, используя эхо-сигналы радиопередатчика FM. В [11] обосновано использование телевизионного передатчика в бистатической радиолокационной системе, позволяющей обнаруживать ВО в диапазоне до 260 км, оценивать их декартовы координаты с использованием расширенного фильтра Калмана. В [12] приведены результаты исследований и экспериментальные данные по применению радиосистем стандарта беспроводной передачи данных LTE для обнаружения движущихся объектов. Стоит отметить, что перечисленные работы, по сути, являются развитием исследований, проведенных в [13–15], но с учетом специфики развития радиолокационной техники и требований, предъявляемых к радиотехническим системам. Важной задачей обработки радиолокационной информации в системах подобного типа является оптимизация процедуры оценки прямоугольных координат ВО и скорости их изменения.

В работе [16] рассмотрен вариант определения координат объекта при использовании пространственно-временного сигнала, что позволяет оценивать на приемной позиции угол, под которым облучается ВО. Это позволяет повысить в ряде случаев точность оценивания координат объектов. В [17] показан выигрыш в точности оценивания координат за счет совместной обработки результатов измерений в разностно-дальномерно-угломерной системе пассивной локации. В статьях [18, 19] показана применимость алгоритмов, основанных на замкнутом виде решения нелинейных уравнений, для оценки местоположения объектов.

Целью статьи является анализ способов определения координат и параметров движения воздушных объектов бистатическими локационными системами при различном составе первичных измерений и количестве передающих позиций.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрим варианты определения координат и параметров движения целей в зависимости от состава измеряемых координат, количества сторонних передатчиков. На рис. 1 приведена геометрия расположения N передающих и приемной позиции при локации ВО.

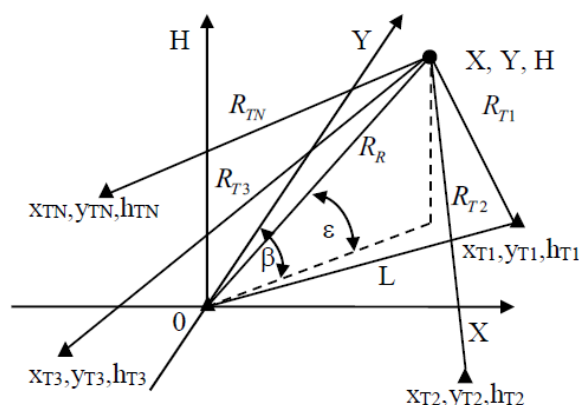


Рис. 1. Геометрия бистатической радиолокационной системы
Fig. 1. Geometry of the bistatic radar system

Параметрами, подлежащими первичному измерению в бистатической системе, являются

$$R_{\Sigma i} = R_R + R_{Ti} = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2} + \sqrt{(X - x_{Ti})^2 + (Y - y_{Ti})^2 + (H - h_{Ti})^2}, \quad (1)$$

$$\beta = a \tan \frac{X}{Y} + \frac{\pi}{2} (2 - \text{sign} X - \text{sign} X \text{sign} Y), \quad \varepsilon = a \tan \frac{H}{\sqrt{X^2 + Y^2}}, \quad (2)$$

где $R_{\Sigma i}$, β , ε – суммарная дальность, азимут и угол места ВО соответственно; R_R – дальность до цели относительно приемной позиции; R_{Ti} – дальности передающая позиция – цель, sign – математическая функция, определяющая знак числа, причем $\text{sign} X = 1$ при $X \geq 0$ и $\text{sign} X = -1$ при $X < 0$, x_{Ti} , y_{Ti} , h_{Ti} – координаты расположения позиций передающих систем [20].

Представим (1) как $R_{\Sigma i}^2 - 2R_{\Sigma i}R_R = L_{Ti}^2 - 2Xx_{Ti} - 2Yy_{Ti} - 2Hh_{Ti}$ и, учитывая, что $X = R_R \cos(\varepsilon)\sin(\beta)$, $Y = R_R \cos(\varepsilon)\cos(\beta)$, $H = R_R \sin(\varepsilon)$, $L_{Ti} = \sqrt{x_{Ti}^2 + y_{Ti}^2 + h_{Ti}^2}$, получим выражение $R_{\Sigma i}^2 - L_{Ti}^2 = 2R_R(R_{\Sigma i} - x_{Ti} \cos(\varepsilon)\sin(\beta) - y_{Ti} \cos(\varepsilon)\cos(\beta) - h_{Ti} \sin(\varepsilon))$, из которого выразим дальность до ВО и его прямоугольные координаты:

$$R_R = \frac{R_{\Sigma}^2 - L_T^2}{2(R_{\Sigma} - x_T \cos(\varepsilon)\sin(\beta) - y_T \cos(\varepsilon)\cos(\beta) - h_T \sin(\varepsilon))}, \quad (3)$$

$$X = \frac{(R_{\Sigma}^2 - L_T^2)\cos(\varepsilon)\sin(\beta)}{2(R_{\Sigma} - x_T \cos(\varepsilon)\sin(\beta) - y_T \cos(\varepsilon)\cos(\beta) - h_T \sin(\varepsilon))}, \quad (4)$$

$$Y = \frac{(R_{\Sigma}^2 - L_T^2)\cos(\varepsilon)\cos(\beta)}{2(R_{\Sigma} - x_T \cos(\varepsilon)\sin(\beta) - y_T \cos(\varepsilon)\cos(\beta) - h_T \sin(\varepsilon))}, \quad (5)$$

$$H = \frac{(R_{\Sigma}^2 - L_T^2)\sin(\varepsilon)}{2(R_{\Sigma} - x_T \cos(\varepsilon)\sin(\beta) - y_T \cos(\varepsilon)\cos(\beta) - h_T \sin(\varepsilon))}. \quad (6)$$

Формулы (3)–(6) подразумевают применение суммарно-дальномерно-угломерной системы при одной передающей позиции.

При наличии N передатчиков из (1)–(2) получим формулу $(R_{\Sigma i}^2 - L_{Ti}^2)\cos(\varepsilon)\cos(\beta) = 2Y(R_{\Sigma i} - y_{Ti} \cos(\varepsilon)\cos(\beta)) - 2Xx_{Ti} \cos(\varepsilon)\cos(\beta) - 2Hh_{Ti} \cos(\varepsilon)\cos(\beta)$, на основании которой запишем матрицы искоемых $A_{R\beta}$ и измеряемых параметров $S_{R\beta}$

$$A_{R\beta} = \begin{bmatrix} x_{T1}\alpha & y_{T1}\alpha - R_{\Sigma 1} & h_{T1}\alpha \\ x_{T2}\alpha & y_{T2}\alpha - R_{\Sigma 2} & h_{T2}\alpha \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{TN}\alpha & y_{TN}\alpha - R_{\Sigma N} & h_{TN}\alpha \end{bmatrix}, \quad S_{R\beta} = 0,5\alpha \begin{bmatrix} (L_{T1}^2 - R_{\Sigma 1}^2) \\ (L_{T2}^2 - R_{\Sigma 2}^2) \\ \vdots \\ (L_{TN}^2 - R_{\Sigma N}^2) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\alpha = \cos(\varepsilon)\cos(\beta)$.

С учетом (7) искомый вектор координат $Z_R = [X, Y, H]^T$ определим, используя метод наименьших квадратов (МНК) [17]:

$$Z_R = (A_{R\beta}^T A_{R\beta})^{-1} A_{R\beta}^T S_{R\beta}. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) подразумевают применение суммарно-дальномерно-угломерной системы при N передающих позициях.

В случае, когда на приемной позиции не производится измерения угловых координат, но возможно измерение N сумм расстояний, представим (1) в виде следующей формы записи:

$R_{\Sigma i} = R_R + \sqrt{(X - x_{Ti})^2 + (Y - y_{Ti})^2 + (H - h_{Ti})^2}$. Полученное выражение преобразуем к виду $R_{\Sigma i}^2 - 2R_{\Sigma i}R_R + 2Xx_{Ti} + 2Yy_{Ti} + 2Hh_{Ti} - L_{Ti}^2 = 0$, что позволит представить соответствующие матрицы как

$$A_R = \begin{bmatrix} x_{T1} & y_{T1} & h_{T1} & -R_{\Sigma 1} \\ x_{T2} & y_{T2} & h_{T2} & -R_{\Sigma 2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{TN} & y_{TN} & h_{TN} & -R_{\Sigma N} \end{bmatrix}, \quad S_R = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} L_{T1}^2 - R_{\Sigma 1}^2 \\ L_{T2}^2 - R_{\Sigma 2}^2 \\ \vdots \\ L_{TN}^2 - R_{\Sigma N}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

и определить прямоугольные координаты ВО по аналогии с (8). Отметим, что в этом случае в состав Z_R входит дальность относительно приемной позиции R_R .

Рассмотрим вариант минимизации количества передающих позиций для определения искомых координат, учитывая, что дальность между воздушным объектом и целью равна $R_R = \|x\| = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2}$, запишем (1) как

$$Xx_{Ti} + Yy_{Ti} + Hh_{Ti} = R_R R_{\Sigma i} + 0,5(L_{Ti}^2 - R_{\Sigma i}^2). \quad (10)$$

На основании (10) получим уравнение

$$Z_T Z_R = S_R + S_{R\Sigma} R_R, \quad (11)$$

где

$$Z_T = \begin{bmatrix} x_{T1} & y_{T1} & h_{T1} \\ x_{T2} & y_{T2} & h_{T2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{TN} & y_{TN} & h_{TN} \end{bmatrix} \quad (12)$$

матрица местоположений позиций передающих систем,

$$S_{R\Sigma} = \begin{bmatrix} R_{\Sigma 1} \\ R_{\Sigma 2} \\ \vdots \\ R_{\Sigma N} \end{bmatrix} \quad (13)$$

матрица измеренных суммарных дальностей.

Левая часть (11) соответствует стандартной форме линейного уравнения, однако правая часть содержит неизвестный параметр $R_R = \|x\|$. Необходимо получить решение, игнорирующее дальность $R_R = \|x\|$ в правой части (11), считая ее постоянной. Получим предварительное решение в виде

$$Z_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T (S_R + S_{RS} R_R). \quad (14)$$

Для определения неизвестного значения R_R в (14) введем дополнительные обозначения

$$U_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T S_R, \quad B_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T S_{RS}, \quad (15)$$

тогда

$$Z_R = U_R + B_R \|x\|. \quad (16)$$

Представив $\|x\| = x^T x$ и возведя в квадрат (16), получаем уравнение относительно $\|x\| = R_R$ в следующей форме записи: $(B_R^T B_R - 1)R_R^2 - 2U_R^T U_R R_R + U_R^T U_R = 0$, решением которого является искомая дальность

$$R_R = \|x\| = \frac{-2U_R^T B_R \pm \sqrt{4(U_R^T B_R)^2 - 4(B_R^T B_R - 1)U_R^T U_R}}{(B_R^T B_R - 1)}. \quad (17)$$

Формулы (9), (14) и (17) подразумевают применение алгоритма суммарно-дальномерной системы локации при N передающих позициях. Полученные формулы позволяют определить прямоугольные координаты ВО при количестве передающих позиций $N = 3$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА

Рассмотрим варианты определения проекций вектора скорости ВО на оси прямоугольной системы координат $\dot{Z}_R = [\dot{X}, \dot{Y}, \dot{H}]^T$, что позволит определить его вектор скорости $V = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2}$. Применив к (8) правила дифференцирования матриц, получим

$$\dot{Z}_R = 0,5 \left[(A_{R\beta}^T A_{R\beta})^{-1} (\dot{A}_{R\beta}^T S_{R\beta} + A_{R\beta}^T \dot{S}_{R\beta}) - (A_{R\beta}^T A_{R\beta})^{-1} (\dot{A}_{R\beta}^T A_{R\beta} + A_{R\beta}^T \dot{A}_{R\beta}) (A_{R\beta}^T A_{R\beta})^{-1} A_{R\beta}^T S_{R\beta} \right], \quad (18)$$

где

$$\dot{A}_{R\beta} = (-1) \begin{bmatrix} x_{T1}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & \dot{R}_{\Sigma 1} + y_{T1}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & h_{T1}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \\ x_{T2}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & \dot{R}_{\Sigma 1} + y_{T2}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & h_{T2}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{TN}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & \dot{R}_{\Sigma 1} + y_{TN}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & h_{TN}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \end{bmatrix}, \quad \dot{S}_{R\beta} = (-0,5) \begin{bmatrix} 2R_{\Sigma 1} \dot{R}_{\Sigma 1} \alpha + (L_{T1}^2 - R_{\Sigma 1}^2)(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \\ 2R_{\Sigma 2} \dot{R}_{\Sigma 2} \alpha + (L_{T2}^2 - R_{\Sigma 2}^2)(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \\ \vdots \\ 2R_{\Sigma N} \dot{R}_{\Sigma N} \alpha + (L_{TN}^2 - R_{\Sigma N}^2)(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \end{bmatrix}_{N \times 1},$$

результат дифференцирования (7) по времени, а $\dot{\alpha}_\varepsilon = \dot{\varepsilon} \sin(\varepsilon) \cos(\beta)$, $\dot{\alpha}_\beta = \dot{\beta} \cos(\varepsilon) \sin(\beta)$.

Выражения (18) подразумевают оценивание проекций вектора скорости цели в суммарно-дальномерно-угломерной системе. При применении (18) необходимо дополнительно оценивать угловые скорости изменения $\dot{\beta}$ и $\dot{\varepsilon}$ способами, рассмотренными, например, в [21]. При отсутствии измерений угловых координат результат дифференцирования (9) по времени запишем в виде

$$\dot{A}_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\dot{R}_{\Sigma 1} \\ 0 & 0 & 0 & -\dot{R}_{\Sigma 2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -\dot{R}_{\Sigma N} \end{bmatrix}, \quad \dot{S}_R = (-1) \begin{bmatrix} R_{\Sigma 1} \dot{R}_{\Sigma 1} \\ R_{\Sigma 2} \dot{R}_{\Sigma 2} \\ \vdots \\ R_{\Sigma N} \dot{R}_{\Sigma N} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Применение (19) по аналогии с (18) позволяет получить искомые проекции вектора скорости цели на оси прямоугольной системы координат и радиальную скорость цели $\dot{R}_R$ относительно приемной позиции при наличии измерений суммарной дальности и скорости ее изменения.

Дифференцирование по времени (13)–(17) позволяет получить следующие формулы:

$$\begin{aligned} \dot{U}_R &= (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T \dot{S}_R, \quad \dot{B}_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T \dot{S}_{R\Sigma}, \\ \dot{R}_R &= -2 \frac{(\dot{U}_R^T B_R + \dot{U}_R^T \dot{B}_R)(B_R^T B_R - 1) - U_R^T B_R (\dot{B}_R^T B_R + B_R^T \dot{B}_R)}{2(B_R^T B_R - 1)^2} \pm \\ &\pm \frac{8(U_R^T B_R)(\dot{U}_R^T B_R + B_R^T \dot{B}_R) - 4((\dot{B}_R^T B_R + B_R^T \dot{B}_R)U_R^T U_R) + (B_R^T B_R - 1)(\dot{U}_R^T U_R + U_R^T \dot{U}_R)}{4(B_R^T B_R - 1)\sqrt{4(U_R^T B_R)^2 - 4(B_R^T B_R - 1)U_R^T U_R}} \pm \\ &\pm \frac{(\dot{B}_R^T B_R + B_R^T \dot{B}_R)\sqrt{4(U_R^T B_R)^2 - 4(B_R^T B_R - 1)U_R^T U_R}}{2(B_R^T B_R - 1)^2}, \end{aligned}$$

где $\dot{S}_{R\Sigma} = \|\dot{R}_{\Sigma 1}, \dot{R}_{\Sigma 2}, \dots, \dot{R}_{\Sigma N}\|^T$.

Суммарная доплеровская частота $F_{\Sigma i}$ связана с $\dot{R}_{\Sigma i}$ известным соотношением $F_{\Sigma i} = \dot{R}_{\Sigma i} / \lambda_i$, где λ_i – длина волны передатчика, и может быть определена известными способами [3, 10, 13–15]. Беря производную по времени от (14), получим зависимость для определения проекций вектора скорости цели на оси прямоугольной системы координат

$$\dot{Z}_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T (\dot{S}_R + \dot{S}_{R\Sigma} R_R + S_{R\Sigma} \dot{R}_R). \quad (20)$$

Формула (20) предполагает вычислительные процедуры суммарно-дальномерной системы при трех и более передающих позициях.

Продифференцировав (1), получим формулу для скорости изменения суммарной дальности

$$\dot{R}_{\Sigma i} = \frac{X\dot{X} + Y\dot{Y} + H\dot{H}}{R_R} + \frac{(X - x_{Ti})\dot{X} + (Y - y_{Ti})\dot{Y} + (H - h_{Ti})\dot{H}}{R_{Ti}}. \quad (21)$$

На основании (21) составим матрицу

$$A_{\Sigma} = \begin{bmatrix} \frac{X\dot{X}}{R_R} + \frac{(X-x_{T1})\dot{X}}{R_{T1}} & \frac{Y\dot{Y}}{R_R} + \frac{(Y-y_{T1})\dot{Y}}{R_{T1}} & \frac{H\dot{H}}{R_R} + \frac{(H-h_{T1})\dot{H}}{R_{T1}} \\ \frac{X\dot{X}}{R_R} + \frac{(X-x_{T2})\dot{X}}{R_{T2}} & \frac{Y\dot{Y}}{R_R} + \frac{(Y-y_{T2})\dot{Y}}{R_{T2}} & \frac{H\dot{H}}{R_R} + \frac{(H-h_{T2})\dot{H}}{R_{T2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X\dot{X}}{R_R} + \frac{(X-x_{TN})\dot{X}}{R_{TN}} & \frac{Y\dot{Y}}{R_R} + \frac{(Y-y_{TN})\dot{Y}}{R_{TN}} & \frac{H\dot{H}}{R_R} + \frac{(H-h_{TN})\dot{H}}{R_{TN}} \end{bmatrix}$$

и определим искомые параметры как $\dot{Z}_R = (A_{\Sigma}^T A_{\Sigma})^{-1} A_{\Sigma}^T \dot{S}_{\Sigma}$, учитывая, что расчет проекций вектора скорости ВО в этом случае подразумевает предварительное определение прямоугольных координат и наклонных дальностей. Полученные формулы подразумевают алгоритм угломерно-суммарно-дальномерной системы при N передающих позициях.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА В ПОЛИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Точность оценки местоположения координат воздушной цели [14, 17] определяется по зависимости $\sigma_S = \sqrt{\text{tr}(G_S^T W_S^{-1} G_S)^{-1}}$, tr – след матрицы, а

$$G_S = \begin{bmatrix} \frac{X}{R_R} + \frac{X-x_{T1}}{R_{T1}} & \frac{Y}{R_R} + \frac{Y-y_{T1}}{R_{T1}} & \frac{H}{R_R} + \frac{H-h_{T1}}{R_{T1}} \\ \frac{X}{R_R} + \frac{X-x_{T2}}{R_{T2}} & \frac{Y}{R_R} + \frac{Y-y_{T2}}{R_{T2}} & \frac{H}{R_R} + \frac{H-h_{T2}}{R_{T2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{Y}{R_g^2} & -\frac{X}{R_g^2} & 0 \\ -\frac{HX}{R_g R_R^2} & -\frac{HY}{R_g R_R^2} & \frac{R_g}{R_R^2} \end{bmatrix},$$

где R_g – горизонтальная дальность до цели, $W_S = \text{diag}[\sigma_{\Sigma 1}^2, \sigma_{\Sigma 2}^2, \sigma_{\Sigma i}^2 \dots \sigma_{\varepsilon}^2, \sigma_{\beta}^2]$ – матрица точности, которую для простоты представим диагональной, σ_{Σ}^2 , σ_{ε}^2 , σ_{β}^2 – дисперсии измерения суммарных дальностей и угловых координат.

На рис. 2, а–е приведены среднеквадратические ошибки определения местоположения при ошибках первичных измерений $\sigma_{\Sigma} = 50$ м, $\sigma_{\varepsilon} = 1$ град., $\sigma_{\beta} = 1$ град. (рис. 2, а–е) и при ошибках первичных измерений $\sigma_{\Sigma} = 50$ м, $\sigma_{\varepsilon} = 4$ град., $\sigma_{\beta} = 4$ град. (рис. 2, з–е) при различных соотношениях горизонтальной дальности до объекта R_g и расстоянии до передающих позиций от начала координат L.

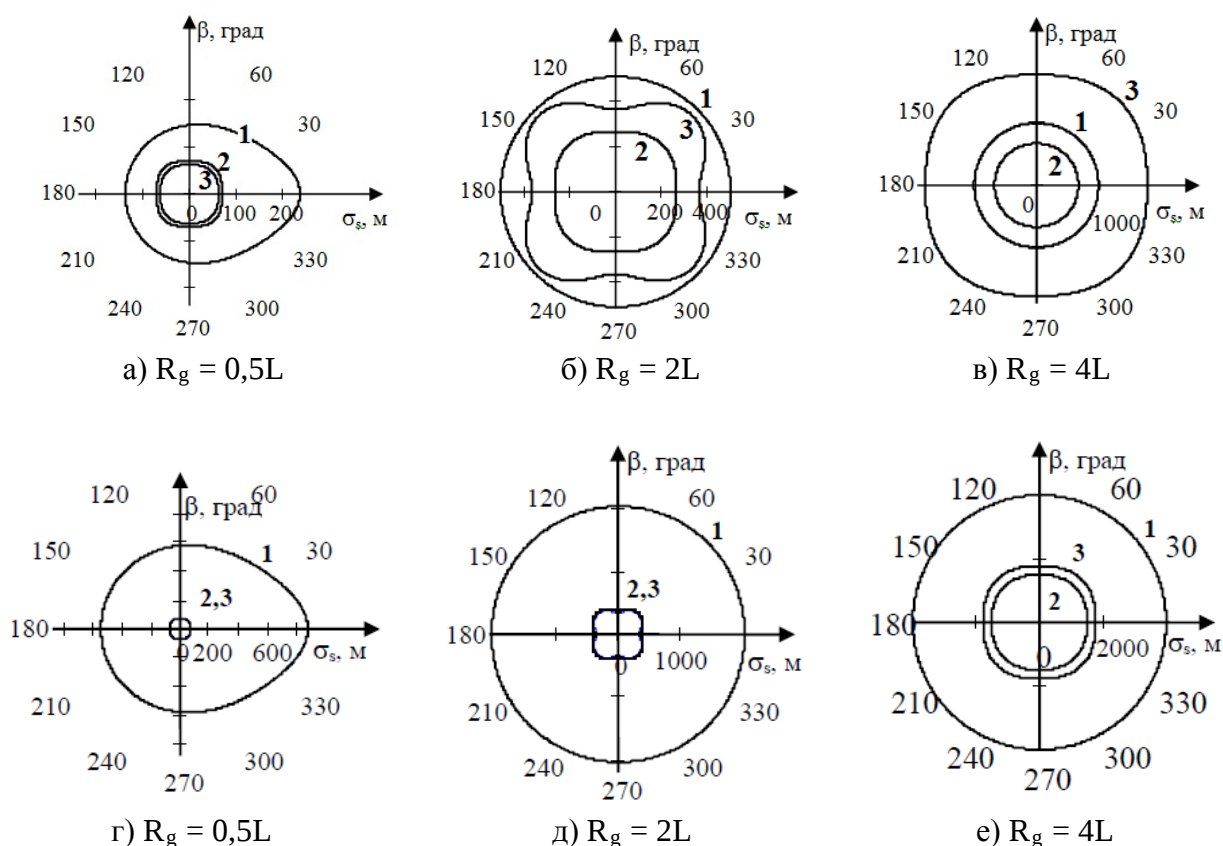


Рис. 2. Среднеквадратические ошибки определения местоположения воздушного объекта

Fig. 2. Mean square errors in the location of an air object

На рисунках цифрами обозначены среднеквадратические ошибки определения местоположения ВО для: 1 – суммарно-дальномерно-угломерной системы при одной передающей позиции, 2 – суммарно-дальномерно-угломерной системы при четырех передающих позициях; 3 – суммарно-дальномерной системы при четырех передающих позициях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены аналитические выражения для определения координат и параметров движения воздушных объектов для различного состава первичных измерений в многопозиционной радиолокационной системе, использующей сторонние источники излучения. Отметим, что полученные алгоритмы для суммарно-дальномерных систем позволяют определять прямоугольные координаты и вектор скорости цели по результатам оценивания суммарно-дальномерных систем и доплеровской частоты за один такт обработки измерений при минимальном количестве передающих позиций.

Показано, что точность определения местоположения воздушного объекта существенно зависит от геометрического фактора точности и ошибок первичных измерений. Наличие угломерных измерений в большинстве случаев обеспечивает более высокую точность измерений при использовании N передатчиков. Увеличение количества передающих позиций, участвующих в обработке переотраженных воздушными объектами сигналов, приводит к повышению точности определения местоположения даже при низкой точности оценивания угловых координат.

Реализация процедур обнаружения-измерения в радиолокационной системе такого типа требует перекрытия зон обзора и потенциала передающих систем, достаточного для достижения высокой вероятности обнаружения. При отсутствии на приемной позиции измерений угловых координат возможны сложности с отождествлением воздушных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bendjama L., Laroussi T.** GLRT-based passive bistatic radar: A performance comparison of illuminators of opportunity // 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC ASET). 2018. Pp. 54–59. DOI:10.1109 / ASET.2018.8379834.
2. **Capria A.** DVB-T passive radar for vehicles detection in urban environment / D. Petri, M. Martorella, M. Conti, E. Dalle Mese, F. Berizzi // 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2010. Pp. 3917–3920. DOI:10.1109/ IGARSS.2010.5649675.
3. **Howland P.E., Maksimiuk D., Reitsma G.** FM radio based bistatic radar // IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation. 2005. Pp. 107–115. DOI:10.1049/ip-rsn: 20045077.
4. **Zaimbashi A., Derakhtian M., Sheikhi A.** Invariant Target Detection in Multiband FM-Based Passive Bistatic Radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2014. Pp. 720–736. DOI:10.1109 / TAES.2013.120248.
5. **Conti M.** High range resolution multichannel DVB-T passive radar / F. Berizzi, M. Martorella, E. Dalle Mese, D. Petri, A. Capria // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2012. Pp. 37–42.
6. **Conti M.** Ambiguity function sidelobes mitigation in multichannel DVB-T Passive Bistatic Radar / D. Petri, A. Capria, M. Martorella, F. Berizzi, E. Dalle Mese // 12th International Radar Symposium (IRS). 2011. Pp. 339–344.
7. **Christiansen J.M., Olsen K.E.** Range and Doppler walk in DVB-T based Passive Bistatic Radar // IEEE Radar Conference. 2010. Pp. 620–626. DOI:10.1109/RADAR.2010.5494548.
8. **Samczyński P., Wilkowski M., Kulpa K.** Trial results on bistatic passive radar using non-cooperative pulse radar as illuminator of opportunity // INTL – International Journal of Electronics and Telecommunications. 2012. Pp. 171–176.
9. **Honda J., Otsuyama T.** Feasibility study on aircraft positioning by using ISDB-T signal delay // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter. 2016. Pp. 1787–1790.
10. **Krysik P.** Doppler-only tracking in GSM-based passive radar / M. Wielgo, J. Misiurewicz, A. Kurowska // 17th International Conference on Information Fusion (FUSION). 2014. Pp. 1–7.
11. **Howland P.E.** Target tracking using television-based bistatic radar // IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation. 1999. Pp. 166–174.
12. **Salah A.** Experimental study of LTE signals as illuminators of opportunity for passive bistatic radar applications / Abdullah R.S.A. Raja, A. Ismail, F. Hashim, Aziz N.H. Abdul // Electronics Letters. 2014. Pp. 545–547. DOI:10.1049/el.2014.0237.
13. **Аверьянов В.Я.** Разнесенные радиолокационные станции и системы. Минск: Техника, 1978. 148 с.
14. **Черняк В.С.** Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
15. **Охрименко А.Е.** Основы обработки и передачи информации. Минск: МВИЗРУ ПВО, 1990. 180 с.
16. **Борисов Е.Г., Поддубный С.С.** Применение пространственно-временных сигналов для определения координат целей в бистатической локационной системе // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 1. С. 9–14.
17. **Машков Г.М., Борисов Е.Г., Владыко А.Г.** Анализ точности определения местоположения объектов дальномерными системами различного типа // Авиационная техника. Сер. Известия высших учебных заведений. 2015. № 4. С. 401–406.

18. Kulpa K., Malanowski M. Two Methods for Target Localization in Multistatic Passive Radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2012. Vol. 48, № 1. Pp. 572–580. DOI:10.1109/TAES.2012.6129656.

19. Mellen G., Pachter M., Raquet J. Closed-form solution for determining emitter location using time difference of arrival measurements // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003. July. Pp. 1056–1058. DOI:10.1109/TAES.2003.1238756.

20. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.

21. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. Радио, 1974. 432 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Борисов Евгений Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, главный специалист по реализации инвестиционных и научно-технических проектов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, begspb1967@mail.ru.

DETERMINATION OF THE LOCATION OF AIR OBJECTS IN POLISTATIC RADAR SYSTEM PARASITISING ON RADIATION TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Evgeny G. Borisov¹

¹*The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication
(SUT), Saint-Petersburg, Russia*

ABSTRACT

Currently, in areas of large cities there is a steady trend towards an increase in the spatial density of telecommunications systems. Saturation of the radio spectrum with analogue and digital systems used to solve problems of radio communication and television allows on their basis improving the technologies for semi-active radar detecting and determining the coordinates of air objects. The introduction of radar surveillance using transmitters not intended for radar purpose is often called a semi-active radar using outside or “parasitic” emission sources. The advantages of the systems are the minimization of the deployment costs, low operational energy costs, a low probability of establishing distortions, stealth operation, environmental friendliness and lack of requirements for radio frequency resource allocation. The relatively large elevations of the antennas of communication and television transmitters with the existing emitted power create favorable conditions for the detection of low altitude air objects. The digital signals of modern telecommunications systems have a spectrum width that provides acceptable resolution and accuracy for measuring the full range and angular coordinates. In general, a system of this type is a poly-static (multi-static) system consisting of one or more radiation sources and one or more receiving positions scattered in space. The promising task such systems solve along with airspace control is air traffic control. The article considers options for determining the rectangular coordinates of air objects in a system of bistatic radar stations using radio emission from external sources for target detection. The variants of the location of air objects with different composition of primary measurements of coordinates and a number of transmitting positions are considered. Analytical expressions are given for calculating the projections of the target velocity vector on the axis of the Cartesian coordinate system. The accuracy of airborne positioning for multi-static radar systems of this type is estimated.

Key words: bistatic location, least square method, total long distance, angular measurements, locate positions, accuracy, semi-active radiolocation.

REFERENCES

1. **Bendjama, L. and Laroussi, T.** (2018). *GLRT-based passive bistatic radar: A performance comparison of illuminators of opportunity*. 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC ASET). pp. 54–59. DOI:10.1109 / ASET.2018.8379834.
2. **Capria, A., Petri, D., Martorella, M., Conti, M., Dalle Mese, E. and Berizzi, F.** (2010). *DVB-T passive radar for vehicles detection in urban environment*. 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 3917–3920. DOI:10.1109/ IGARSS.2010.5649675.
3. **Howland, P.E., Maksimiuk, D. and Reitsma, G.** (2005). *FM radio based bistatic radar*. IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation, pp. 107–115. DOI:10.1049/ip-rsn: 20045077.
4. **Zaimbashi, A., Derakhtian, M. and Sheikhi, A.** (2014). *Invariant Target Detection in Multiband FM-Based Passive Bistatic Radar*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 720–736. DOI:10.1109 / TAES.2013.120248.
5. **Conti, M., Berizzi, F., Martorella, M., Dalle Mese, E., Petri, D. and Capria, A.** (2012). *High range resolution multichannel DVB-T passive radar*. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, pp. 37–42.
6. **Conti, M., Petri, D., Capria, A., Martorella, M., Berizzi, F. and Dalle Mese, E.** (2011). *Ambiguity function sidelobes mitigation in multichannel DVB-T Passive Bistatic Radar*. 12th International Radar Symposium (IRS), pp. 339–344.
7. **Christiansen, J.M. and Olsen, K.E.** (2010). *Range and Doppler walk in DVB-T based Passive Bistatic Radar*. IEEE Radar Conference, pp. 620–626. DOI:10.1109/RADAR.2010.5494548.
8. **Samczyński, P., Wilkowski, M. and Kulpa, K.** (2012). *Trial results on bistatic passive radar using non-cooperative pulse radar as illuminator of opportunity*. INTL – International Journal of Electronics and Telecommunications, pp. 171–176.
9. **Honda, J. and Otsuyama, T.** (2016). *Feasibility study on aircraft positioning by using ISDB-T signal delay*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, pp. 1787–1790.
10. **Krysiak, P., Wielgo, M., Misiurewicz, J. and Kurowska, A.** (2014). *Doppler-only tracking in GSM-based passive radar*. 17th International Conference on Information Fusion (FUSION), pp. 1–7.
11. **Howland, P.E.** (1999). *Target tracking using television-based bistatic radar*. IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation, pp. 166–174.
12. **Salah, A., Raja Abdullah, R.S.A., Ismail, A., Hashim, F. and Abdul Aziz, N.H.** (2014). *Experimental study of LTE signals as illuminators of opportunity for passive bistatic radar applications*. Electronics Letters, pp. 545–547. DOI:10.1049/el.2014.0237.
13. **Averyanov, V.Ya.** (1978). *Raznesennye radiolokatsionnye stantsii i sistemy* [Separated radar stations and systems]. Minsk: Tekhnika, 1978, 148 p. (in Russian)
14. **Chernyak, V.S.** (1993). *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [Multi-position Radiolocation], Moscow: Radio i Svyaz, 1993, 416 p. (in Russian)
15. **Okhrimenko, A.E.** (1990). *Osnovy obrabotki i peredachi informatsii* [Fundamentals of information processing and transmission]. Minsk: MVIZRU PVO, 1990, 180 p. (in Russian)
16. **Borisov, E.G. and Poddubnyy, S.S.** (2017). *Primenenie prostranstvenno-vremennykh signalov dlya opredeleniya koordinat tselei v bistaticheskoy lokatsionnoy sisteme* [Application of space-time signals for the determination of target coordinates in a bistatic location system]. *Voprosy radioelektroniki* [Problems of radio-electronics], no. 1, pp. 9–14. (in Russian)
17. **Mashkov, G.M., Borisov, E.G. and Vladyko, A.G.** (2015). *Analiz tochnosti opredeleniya mestopolozheniya obyektov dalnomernymi sistemami razlichnogo tipa* [Analysis of Object Positioning Accuracy provided by range-finding systems of various types]. Russian Aeronautics, pp. 401–406. DOI: 10.3103/S1068799815040078. (in Russian)

18. Kulpa, K. and Malanowski, M. (2012). *Two Methods for Target Localization in Multi-static Passive Radar*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 48, no. 1, pp. 572–580. DOI:10.1109/TAES.2012.6129656.

19. Mellen, G., Pachter, M. and Raquet, J. (2003). *Closed-form solution for determining emitter location using time difference of arrival measurements*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, July, pp. 1056–1058. DOI:10.1109/TAES.2003.1238756.

20. Shirman, Ya.D. and Manzhos, V.N. (1981). *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh* [Theory and technique of processing radar information against background noise]. Moscow: Radio i svyaz, 416 p. (in Russian)

21. Kuzmin, S.Z. (1974). *Osnovy teorii tsifrovoy obrabotki radiolokatsionnoy informatsii* [Fundamentals of the theory of digital processing of radar information]. Moscow: Sov. Radio, 432 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgeny G. Borisov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Specialist on the Implementation of Investment and Scientific Technical Projects, Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, begspb1967@mail.ru.

Поступила в редакцию 06.07.2018
Принята в печать 18.09.2018

Received 06.07.2018
Accepted for publication 18.09.2018