

На правах рукописи



Лыонг Чинь Ван

**ГИБРИДНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ
ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ
НЕПОДВИЖНОГО И ПОДВИЖНОГО ПУНКТОВ ПРИЕМА**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения
Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель: – Паршин Юрий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «РГРТУ», г. Рязань, зав. кафедрой

Официальные оппоненты: – Костров Виктор Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «МИ ВлГУ», г. Муром

– Давыдочкин Вячеслав Михайлович,
кандидат технических наук,
начальник отдела ООО «Предприятие Контакт-1», г. Рязань

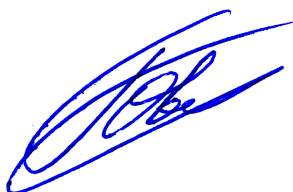
Ведущая организация: – ОП НИИ «Рассвет» ОАО «Корпорация Фазотрон – НИИР», г. Рязань

Защита состоится **6 июня 2014 года в 11 часов 30 минут** на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан «____» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время широкое распространенное получили радиотехнические устройства, являющиеся источниками радиоизлучения, что создает взаимные помехи. В частности, эти радиотехнические устройства создают мощные помехи для систем радиовещания, телевидения и навигации. Для повышения помехоустойчивости работы необходимо определять местоположение этих источников радиоизлучения, что позволяет обеспечить электромагнитную совместимость путем рационального пространственного размещения радиотехнических систем. Для определения местоположения источников радиоизлучения широко применяются пассивные радиотехнические системы (РТС). Отличием пассивной РТС от активной является отсутствие излучения зондирующих сигналов, что не изменяет электромагнитную обстановку в районе расположения радиосистем и не влияет на работу других радиотехнических средств. Кроме того, приём пассивной РТС радиоволн, отражаемых земной и водной поверхностями, может быть использован для обзора местности в навигационных целях. Таким образом, задача определения местоположения источника радиоизлучения пассивным РТС является актуальной.

Задача определения местоположения источника радиоизлучения является предметом интенсивных исследований многих ученых и научных коллективов. В работах Я.Д. Ширмана, Ю.Г. Сосулина, В.С. Черняка, В.С. Кондратьева, В.И. Меркулова, В.Б. Алмазова, В.Я. Аверьянова, H.J. Du, P.Y. Lee, Li Cong, Weihua Zhuang, Ali Broumandan, Tao Lin, John Nielsen, H.C. Schau и др. исследованы оптимальные алгоритмы определения координат источника радиоизлучения. Однако для реализации этих алгоритмов необходимы большое количество неподвижных пунктов приема, а также априорная информация о параметрах движения источника радиоизлучения.

В настоящее время задачи разработки и исследования алгоритмов определения координат движущегося источника радиоизлучения решены не полностью. Поэтому тема диссертации, посвященная разработке гибридных алгоритмов TDOA-AOA на основе комбинации гиперболического (TDOA – Time Difference of Arrival) и триангуляционного (AOA – Angle of Arrival) алгоритмов с использованием методов статистического оценивания для повышения точности определения координат подвижных источников радиоизлучения при наличии случайных ошибок измерений в результате действия помех в пассивной РТС является актуальной.

Целью работы является разработка гибридных алгоритмов TDOA-AOA, обеспечивающих повышение точности определения пространственных координат источников радиоизлучения пассивной двухпозиционной РТС с неподвижным и подвижным пунктами приема в условиях действия случайных ошибок измерений и неполноты априорных сведений.

Для достижения цели работы поставлены и решены следующие задачи:

1) Обоснование оптимальной пространственной структуры пассивной РТС определения местоположения источника радиоизлучения, в том числе

размещение пунктов приема, а также маневренности пунктов приема с использованием статистических методов обработки данных и определения координат.

2) Разработка модели измерений и алгоритмов определения координат источника радиоизлучения таких, как гиперболический, триангуляционный и гибридный TDOA-AOA алгоритмы при использовании неподвижного и подвижного пунктов приема.

3) Модификация алгоритмов статистического оценивания для повышения точности определения пространственных координат источника радиоизлучения на основе гибридного алгоритма TDOA-AOA и статистического оценивания при действии случайных ошибок измерений.

4) Разработка гибридных алгоритмов TDOA-AOA оптимального оценивания координат и параметров движения маневрирующего источника радиоизлучения при использовании подвижного пункта приема в условиях действия случайных ошибок измерений, возмущений траектории и неточности начальной оценки координат и параметров движения.

5) Разработка варианта технической реализации полученных алгоритмов с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Методы исследования: в диссертационной работе используются методы статистической радиотехники, математической статистики, теории оптимального оценивания, матричного исчисления, методов вычислительной математики, параметрического моделирования случайных процессов. Данные теоретические методы сочетались с анализом полученных алгоритмов методом статистического моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Гибридный алгоритм TDOA-AOA определения координат подвижного источника радиоизлучения при применении пассивной двухпозиционной РТС с неподвижным и подвижным пунктами приема, что позволяет определять пространственные координаты и параметры движения (скорость, ускорение и др.) на интервале наблюдения траектории с высокой точностью.

2) Алгоритмы статистического оценивания на основе гибридного алгоритма TDOA-AOA и статистических методов, позволяющие уменьшить погрешность определения пространственных координат источника радиоизлучения на $(19,1 \div 40,7)\%$ в условиях действия случайных ошибок измерений и неполной априорной информации.

3) Статистический алгоритм квазиоптимального оценивания координат источника радиоизлучения на основе гибридного алгоритма TDOA-AOA и методов статистического оценивания, позволяющий уменьшить вычислительные затраты на 50 % при действии случайных ошибок измерений и неполной априорной информации о параметрах движения объекта.

4) Комплексируемый гибридный алгоритм TDOA-AOA оптимального оценивания пространственных координат маневрирующего источника радиоизлучения на основе комбинации рекуррентного и нерекуррентного гибридных алгоритмов TDOA-AOA, динамической модели движения при применении пассивной двухпозиционной РТС с неподвижным и подвижным

пунктами приема, позволяющий уменьшить погрешность определения координат на 28,5% в условиях действия случайных ошибок измерений, возмущений траектории и неточности начальной оценки параметров движения.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1) Предложен гибридный алгоритм TDOA-AOA измерения координат источника радиоизлучения при применении пассивной двухпозиционной РТС, отличающийся тем, что используется неподвижный и подвижный пункты приема, что позволяет определить пространственные координаты и параметры движения (скорость, ускорение и др.) подвижного источника радиоизлучения при значительно меньшем числе пунктов приема.

2) Обосновано комплексирование рекуррентного и нерекуррентного гибридных алгоритмов TDOA-AOA оценки пространственных координат и параметров движения маневрирующего источника радиоизлучения при применении пассивной двухпозиционной РТС с неподвижным и подвижным пунктами приема, отличающийся тем, что на начальном этапе оценивание производится рекуррентным алгоритмом, а на последующих этапах оценивание производится нерекуррентным алгоритмом, причем результаты оценивания на первом этапе являются начальными условиями для оценивания на последующих этапах.

Научное и практическое значение. Полученные результаты целесообразно использовать в пассивных РТС для повышения точности оценивания координат движущегося источника радиоизлучения с помощью неподвижного и подвижного пунктов приема в условиях действия случайных ошибок измерений и параметрической априорной неопределенности.

Апробация работы. Научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: «42-я научно-техническая конференция» (г. Рязань, РГРТУ, 2012 г.); XVII всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях - НИТ-2012» (г. Рязань, РГРТУ, 2012 г.); XVIII всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях - НИТ-2013» (г. Рязань, РГРТУ, 2013 г.); VII всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь» (г. Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2013 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ. Из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, 2 статьи в межвузовском сборнике научных трудов, 4 тезиса докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы из 140 источников, приложения. Диссертация содержит 144 стр., в том числе 122 стр. основного текста, 21 таблица, 45 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определена цель и сформулированы решаемые в работе задачи. Перечислены новые научные

результаты, полученные при выполнении работы, показаны практическая ценность и результаты апробации работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков пассивных многопозиционных РТС определения местоположения источника радиоизлучения, разработана пространственная структура пассивной двухпозиционной РТС на рисунке 1. Пассивная двухпозиционная РТС состоит из подвижного пункта приема T_2 , неподвижного пункта приема T_1 и пункта центральной обработки информации, располагающегося на земле. Предполагается, что начало системы координат совмещено с расположением пункта приема $T_1 \equiv O$. Пассивная двухпозиционная РТС располагает техническими средствами для измерения следующих параметров принятых радиосигналов:

- разность расстояния от источника радиоизлучения до пунктов приема T_1 и T_2 ,
- угловая координата - азимут источника радиоизлучения относительно пункта приема T_2 ,
- угловые координаты - азимут и угол места источника радиоизлучения относительно пункта приема T_1 .

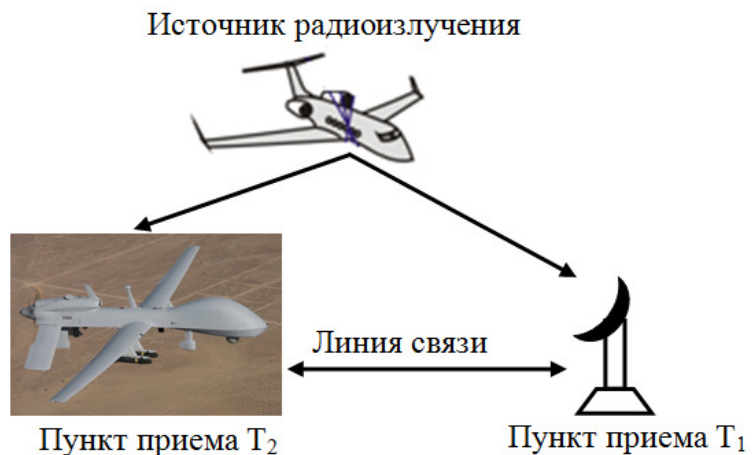


Рисунок 1

Кроме того, полагается, что с помощью приемника синхронизации и навигации определяются текущие координаты подвижного пункта приема T_2 и координаты неподвижного пункта приема T_1 .

Во втором разделе рассмотрены алгоритмы измерения координат объекта, несущего источник радиоизлучения, на основе полученных измерений.

Пространственная структура пассивной двухпозиционной РТС для реализации триангуляционного алгоритма отображена на рисунке 2. В начале координат $O(0,0,0)$ находится пункт приема T_1 , в котором в момент времени t_i , $i = 1, \dots, n$, здесь n - число измерений T_1 , измеряются азимут $\beta_{1/i}$ и угол места $\varepsilon_{1/i}$ объекта. Обозначим $(x_{2/i}, y_{2/i}, z_{2/i})$ - координаты пункта приема T_2 , движущегося относительно пункта приема T_1 ; $(x_{M/i}, y_{M/i}, z_{M/i})$ - координаты

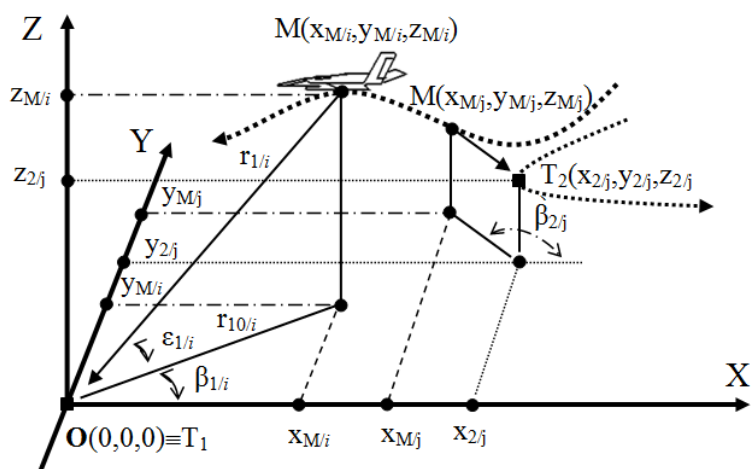


Рисунок 2

объекта M , движущегося относительно пунктов приема T_1 и T_2 . На интервале времени наблюдения $(0, t_n)$, в некоторые моменты времени t_j , $j=1, \dots, h$, здесь h - число измерений пункта приема T_2 , с помощью подвижного пункта приема T_2 измеряется азимут $\beta_{2/j}$ объекта. Траектория движения объекта M аппроксимируется полиномом K -й степени:

$$x_{M/i} = x_0 + \sum_{p=1}^K t_i^p a_p, \quad y_{M/i} = y_0 + \sum_{p=1}^K t_i^p b_p, \quad z_{M/i} = z_0 + \sum_{p=1}^K t_i^p c_p, \quad (1)$$

где x_0, y_0, z_0 - координаты объекта M в начальном моменте времени $t=0$, a_p, b_p, c_p - параметры (скорость, ускорение и т.д.) движения по осям x, y, z .

При движении объекта M и пункта приема T_2 измеряются величины $\beta_{1/i}$, $\varepsilon_{1/i}$, $\beta_{2/j}$, $x_{2/j}$, $y_{2/j}$, $i=1, \dots, n$ и $j=1, \dots, h$. Триангуляционный алгоритм измерения координат объекта определяется объединением координатных уравнений пунктов приема:

$$\operatorname{tg} \beta_{1/i} = \frac{y_{M/i}}{x_{M/i}}, \quad \operatorname{tg} \varepsilon_{1/i} = \frac{z_{M/i}}{r_{10/i}}, \quad \operatorname{tg} \beta_{2/j} = \frac{y_{M/j} - y_{2/j}}{x_{M/j} - x_{2/j}}, \quad i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, h. \quad (2)$$

После постановки координаты объекта (1) в уравнение (2) получаем уравнение наблюдений в матричном виде:

$$\mathbf{m}_1 = \mathbf{g}_1 \mathbf{X}_1, \quad (3)$$

где $\mathbf{X}_1 = (x_0, y_0, z_0, a_1, \dots, a_K, b_1, \dots, b_K, c_1, \dots, c_K)^T$ - неизвестный $3(K+1)$ - вектор, $\mathbf{m}_1 = (0, 0, \dots, 0, 0, m_{1/1}, \dots, m_{1/h})^T$ - измеряемый $2n+h$ - вектор, $m_{1/j} = x_{2/j} \sin \beta_{2/j} - y_{2/j} \cos \beta_{2/j}$,

$$\mathbf{g}_1 = \begin{bmatrix} \sin \beta_{1/i} - \cos \beta_{1/i} & 0 & t_i \sin \beta_{1/i} \dots t_i^K \sin \beta_{1/i} - t_i \cos \beta_{1/i} \dots - t_i^K \cos \beta_{1/i} & 0 & \dots & 0 \\ \operatorname{tg} \varepsilon_{1/i} & 0 & -\cos \beta_{1/i} & t_i \operatorname{tg} \varepsilon_{1/i} \dots t_i^K \operatorname{tg} \varepsilon_{1/i} & 0 & \dots & 0 & -t_i \cos \beta_{1/i} \dots - t_i^K \cos \beta_{1/i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sin \beta_{2/j} - \cos \beta_{2/j} & 0 & t_j \sin \beta_{2/j} \dots t_j^K \sin \beta_{2/j} - t_j \cos \beta_{2/j} \dots - t_j^K \cos \beta_{2/j} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ i=1, \dots, n; j=1, \dots, h. \end{bmatrix}.$$

Триангуляционный алгоритм оценивания координат по критерию минимума среднего квадрата ошибки получается путем решения обратной задачи по наблюдениям (3): $\mathbf{X}_1^* = \mathbf{g}_1^+ \mathbf{m}_1$, где $\mathbf{g}_1^+$ - псевдообратная матрица.

Пространственная структура пассивной двухпозиционной РТС для реализации гиперболического алгоритма отображена на рисунке 3. При движении пункта приема T_2 и объекта M в каждый момент времени t_i , $i=1, \dots, n$, измеряются $d_i = r_{2/i} - r_{1/i}$ - разность расстояния от объекта до пунктов приема, $(x_{2/i}, y_{2/i}, z_{2/i})$ - координаты пункта приема T_2 и $L_i = \sqrt{x_{2/i}^2 + y_{2/i}^2 + z_{2/i}^2}$. Из уравнения разности расстояния, следует:

$$L_i^2 - d_i^2 = 2x_{2/i}x_{M/i} + 2y_{2/i}y_{M/i} + 2z_{2/i}z_{M/i} + 2d_i r_{1/i}, \quad i=1, \dots, n. \quad (4)$$

После постановки координат объекта (1) и приближенного представления функции $r_{1/i} \approx r_0 + \sum_{p=1}^S t_i^p \alpha_p$, где

$$\alpha_p = \frac{1}{p!} \frac{\partial^{(p)} r_{1/i}}{\partial^{(p)} t_i} \Big|_{(x_0, y_0, z_0)}$$

коэффициенты разложения, $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$, в уравнение (4), следует:

$$\mathbf{m}_2 = \mathbf{g}_2 \mathbf{X}_2 \quad (5)$$

где

$\mathbf{X}_2 = (x_0, y_0, z_0, a_1, \dots, a_K, b_1, \dots, b_K, c_1, \dots, c_K, r_0, \alpha_1, \dots, \alpha_S)^T$ - неизвестный

$3(K+1)+S+1$ - вектор, $\mathbf{m}_2 = (L_1^2 - d_1^2, \dots, L_n^2 - d_n^2)^T$ - измеряемый n - вектор,

$$\mathbf{g}_2 = 2 \begin{bmatrix} x_{2/i} & y_{2/i} & z_{2/i} & t_i x_{2/i} & \dots & t_i^K x_{2/i} & t_i y_{2/i} & \dots & t_i^K y_{2/i} & t_i z_{2/i} & \dots & t_i^K z_{2/i} & d_i & t_i d_i & \dots & t_i^S d_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ i=1, \dots, n \end{bmatrix}.$$

Гиперболический алгоритм оценивания координат источника радиоизлучения по критерию минимума среднего квадрата ошибки получается путем решения обратной задачи оценивания по наблюдениям (5): $\mathbf{X}_2^* = \mathbf{g}_2^+ \mathbf{m}_2$.

Для достижения более высокой точности определения координат источника радиоизлучения используется комбинация двух или более из этих алгоритмов. Гибридный алгоритм TDOA-AOA позволяет использовать достоинства методов TDOA и AOA такие, как высокая точность измерения

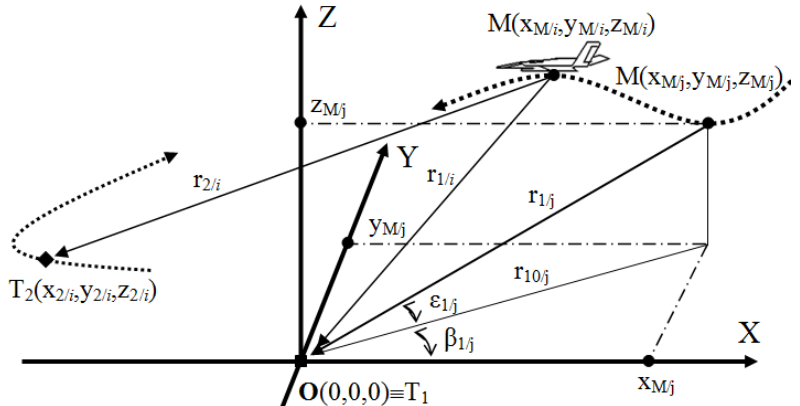


Рисунок 4

координат, уменьшение количества пунктов приема. Пространственное расположение объекта и пунктов приема для реализации гибридного алгоритма TDOA-AOA отображено на рисунке 4. При движении пункта приема T_2 и объекта M в каждый момент времени t_i , $i=1, \dots, n$, где n - число измерений, измеряются величины $d_i = r_{2/i} - r_{1/i}$, $x_{2/i}$, $y_{2/i}$, $z_{2/i}$, $L_i = \sqrt{x_{2/i}^2 + y_{2/i}^2 + z_{2/i}^2}$. На интервале наблюдения $(0, t_n)$, в некоторые моменты t_j , $j=1, \dots, h \leq n$, с помощью неподвижного пункта приема T_1 измеряются угловые координаты $\beta_{1/j}$, $\varepsilon_{1/j}$ объекта.

Гибридный алгоритм TDOA-AOA определения координат объекта образуется путем дополнения гиперболического алгоритма (5) уравнениями триангуляционного алгоритма (2):

$$d_i = r_{2/i} - r_{1/i}, \quad \text{tg} \beta_{1/j} = \frac{y_{M/j}}{x_{M/j}}, \quad \text{tg} \varepsilon_{1/j} = \frac{z_{M/j}}{r_{10/j}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, h, \quad (6)$$

После постановки координат объекта M (1) и приближенной функции $r_{1/i}$ в систему уравнений (6), следует:

$$\mathbf{m}_3 = \mathbf{g}_3 \mathbf{X}_3, \quad (7)$$

где $\mathbf{X}_3 = (x_0, y_0, z_0, a_1, \dots, a_K, b_1, \dots, b_K, c_1, \dots, c_K, r_0, \alpha_1, \dots, \alpha_S)^T$ - неизвестный $3(K+1) + S + 1$ - вектор, $\mathbf{m}_3 = (L_1^2 - d_1^2, \dots, L_n^2 - d_n^2, 0, 0, \dots, 0, 0)^T$ - измеряемый $n + 2h$ - вектор,

$$\mathbf{g}_3 = \begin{bmatrix} 2x_{2/i} & 2y_{2/i} & 2z_{2/i} & 2x_{2/i}t_i & \dots & 2x_{2/i}t_i^K & 2y_{2/i}t_i & \dots & 2y_{2/i}t_i^K & 2z_{2/i}t_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sin \beta_{1/j} & -\cos \beta_{1/j} & 0 & t_j \sin \beta_{1/j} & \dots & t_j^K \sin \beta_{1/j} & -t_j \cos \beta_{1/j} & \dots & -t_j^K \cos \beta_{1/j} & 0 \\ \text{tg} \varepsilon_{1/j} & 0 & -\cos \beta_{1/j} & t_j \text{tg} \varepsilon_{1/j} & \dots & t_j^K \text{tg} \varepsilon_{1/j} & 0 & \dots & 0 & -t_j \cos \beta_{1/j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, h \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} \dots & 2z_{2/i}t_i^K & 2d_i & 2d_it_i & \dots & 2d_it_i^S \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & -t_j^K \cos \beta_{1/j} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Рассмотрим источники погрешностей измерения координат объекта гибридным алгоритмом TDOA+AOA. Измеренные значения получены в виде:

$$d_i^* = d_i + \xi_{d/i},$$

$$\beta_{1/j}^* = \beta_{1/j} + \xi_{\beta/j}, \quad \varepsilon_{1/j}^* = \varepsilon_{1/j} + \xi_{\varepsilon/j}, \quad (8)$$

где $d_i, \beta_{1/j}, \varepsilon_{1/j}$ - точные измерения, $\xi_{d/i}, \xi_{\beta/j}, \xi_{\varepsilon/j}$ - случайные погрешности

измерений, которые имеют нормальное распределение $N(0, \sigma_d^2)$, $N(0, \sigma_\beta^2)$ и $N(0, \sigma_\varepsilon^2)$; здесь $\sigma_d^2, \sigma_\beta^2, \sigma_\varepsilon^2$ - дисперсии ошибки измерений. Для практической реализации алгоритма величины $d_i, \beta_{1/i}, \varepsilon_{1/i}$ предлагается заменить их измеренными значениями $d_i^*, \beta_{1/i}^*, \varepsilon_{1/i}^*$ при вычислении матрицы $\mathbf{g}_3$ и $\mathbf{m}_3$.

Оптимальная оценка координат получена методом наименьших квадратов (МНК) в результате модифицированного решения обратной задачи (7) при наблюдении с ошибками:

$$\mathbf{X}_{\text{МНК}}^* = \left[(\mathbf{g}_3^*)^T \mathbf{g}_3^* \right]^{-1} (\mathbf{g}_3^*)^T \mathbf{m}_3^*, \quad (9)$$

где $\mathbf{X}_{\text{МНК}}^* = (x_0^*, y_0^*, z_0^*, a_1^*, \dots, a_K^*, b_1^*, \dots, b_K^*, c_1^*, \dots, c_K^*, r_0^*, \alpha_1^*, \dots, \alpha_S^*)^T$ - полученная оценка, $\mathbf{g}_3^* = \mathbf{g}_3(d_i^*, \beta_{1/i}^*, \varepsilon_{1/i}^*)$, $\mathbf{m}_3^* = \mathbf{m}_3(d_i^*, \beta_{1/i}^*, \varepsilon_{1/i}^*)$.

Подставляя измеренные величины со случайными ошибками измерений в асимптотическое уравнение (7), получим матричное уравнение:

$$\mathbf{m}_3 \approx \mathbf{g}_3 \mathbf{X}_3 + \boldsymbol{\theta}_3, \quad (10)$$

$$\text{где } \boldsymbol{\theta}_3 = \left(\xi_{d/i}(2r_{1/i} + 2d_i), \dots, \xi_{\beta/j}(r_{1/j} \cos \varepsilon_{1/j}), \xi_{\varepsilon/j} \left(r_{1/j} \frac{\cos \beta_{1/j}}{\cos \varepsilon_{1/j}} \right), \dots, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, h \right)^T$$

- $(n + 2h)$ -мерный вектор случайных ошибок измерений.

Модифицированный алгоритм оптимального оценивания координат объекта, полученный методом максимального правдоподобия (МП) по наблюдаемым данным (10), имеет вид:

$$\mathbf{X}_{ММП}^* = \left[(\mathbf{g}_3^*)^T (\mathbf{R}^*)^{-1} \mathbf{g}_3^* \right]^{-1} (\mathbf{g}_3^*)^T (\mathbf{R}^*)^{-1} \mathbf{m}_3^*, \quad (11)$$

где $\mathbf{X}_{ММП}^*$ - полученная оценка; $\mathbf{R}^* = \mathbf{R}(\mathbf{X}_{МНК}^*) = \text{diag} \left[4\sigma_d^2 (r_{1/i}^* + d_i^*)^2, \dots, \sigma_\beta^2 (r_{1/j}^* \cos \varepsilon_{1/j}^*)^2, \sigma_\varepsilon^2 \left(r_{1/j}^* \frac{\cos \beta_{1/j}^*}{\cos \varepsilon_{1/j}^*} \right)^2, \dots, i=1, \dots, n; j=1, \dots, h \right]$.

Подставляя измеренные величины со случайными ошибками в асимптотическое уравнение (7), получим другое матричное уравнение:

$$\mathbf{m}_3 = \mathbf{g}_3 \mathbf{X}_3 + \xi \mathbf{A} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_3 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где $\xi = \text{diag} [\xi_{d/i}, \dots, \xi_{\beta/j}, \xi_{\varepsilon/j}, \dots, i=1, \dots, n; j=1, \dots, h]$ - диагональная матрица ошибок измерений разности расстояния и угловых координат, $e_j = \text{tg} \varepsilon_{1/j} \cos \beta_{1/j}$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 2 & 2t_i & \dots & 2t_i^s & 2d_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cos \beta_j & \sin \beta_j & 0 & t_j \cos \beta_j & \dots & t_j^K \cos \beta_j & t_j \sin \beta_j & \dots & t_j^K \sin \beta_j & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & e_j & t_j & \dots & t_j^K & 0 & \dots & 0 & e_j t_j & \dots & e_j t_j^K & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ i=1, \dots, n; j=1, \dots, h \end{bmatrix}.$$

Квазиоптимальный алгоритм оценивания координат объекта, полученный методом максимального правдоподобия по наблюдениям (12), имеет вид:

$$\mathbf{X}_{КМП}^* = \left[(\mathbf{g}_3^*)^T (\mathbf{R}_1^*)^{-1} \mathbf{g}_3^* \right]^{-1} (\mathbf{g}_3^*)^T (\mathbf{R}_1^*)^{-1} \mathbf{m}_3^*. \quad (13)$$

где $\mathbf{R}_1^* = \mathbf{R}_1(\mathbf{X}_{МНК}^*) = \left[\xi \mathbf{A} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{МНК}^* \\ 1 \end{pmatrix} \right] \left[\xi \mathbf{A} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{МНК}^* \\ 1 \end{pmatrix} \right]^T = \xi \mathbf{A} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{МНК}^* \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{X}_{МНК}^* \\ 1 \end{pmatrix}^T \mathbf{A}^T \xi^T = \overline{\xi \mathbf{B} \xi^T} =$
 $= \text{diag} [\sigma_d^2 B_{ii}, \dots, \sigma_\beta^2 B_{jj}, \sigma_\varepsilon^2 B_{jj}, \dots, i=1, \dots, n, j=1, \dots, h]; \mathbf{B} = \mathbf{A} \mathbf{R}_x^* \mathbf{A}^T;$
 $\mathbf{R}_x^* = \mathbf{R}_x(\mathbf{X}_{МНК}^*) = \text{diag} [(x_0^*)^2, (y_0^*)^2, \dots, (\alpha_s^*)^2, 1]; \mathbf{X}_{КМП}^*$ - полученная квазиоптимальная оценка.

Видно, что для реализации алгоритмов, полученных методом максимального правдоподобия, необходимо получить априорные сведения для оценивания корреляционной матрицы, например, методом наименьших квадратов (9). Для упрощения алгоритма оценивания и уменьшения вычислительных затрат предлагается статистический алгоритм, в котором при расчете $\mathbf{R}_1$ полагается, что измеряемые величины $x_0, y_0, z_0, a_p, b_p, c_p, p=1, \dots, K$ являются независимыми случайными числами с известными

вторыми начальными моментами и равномерным распределением на априорно заданном интервале:

$$\begin{aligned}\overline{x_0^2} = \overline{y_0^2} &= \frac{1}{R_{\max}} \int_0^{R_{\max}} x_0^2 dx_0 = \frac{R_{\max}^2}{3}, \quad \overline{z_0^2} = \frac{1}{H_{\max}} \int_0^{H_{\max}} z_0^2 dz_0 = \frac{H_{\max}^2}{3}, \quad \overline{r_0^2} = \overline{x_0^2} + \overline{y_0^2} + \overline{z_0^2}, \\ \overline{a_1^2} = \overline{b_1^2} = \overline{c_1^2} &= \frac{1}{V_{\max} - V_{\min}} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} a_1^2 da_1 = \frac{V_{\max}^3 - V_{\min}^3}{3(V_{\max} - V_{\min})}, \\ \overline{a_2^2} = \overline{b_2^2} = \overline{c_2^2} &= \frac{1}{W_{\max} - W_{\min}} \int_{W_{\min}}^{W_{\max}} a_2^2 da_2 = \frac{W_{\max}^3 - W_{\min}^3}{3(W_{\max} - W_{\min})}.\end{aligned}$$

Статистический алгоритм оптимального оценивания координат объекта, полученный методом максимального правдоподобия, имеет вид:

$$\mathbf{X}_{\text{МП}}^* = \left[(\mathbf{g}_3^*)^T (\overline{\mathbf{R}}_1)^{-1} \mathbf{g}_3^* \right]^{-1} (\mathbf{g}_3^*)^T (\overline{\mathbf{R}}_1)^{-1} \mathbf{m}_3^*. \quad (14)$$

$$\text{где } \overline{\mathbf{R}}_1 = \mathbf{R}_1(\overline{\mathbf{X}}_3) = \left[\xi \mathbf{A} \begin{pmatrix} \overline{\mathbf{X}}_3 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \left[\xi \mathbf{A} \begin{pmatrix} \overline{\mathbf{X}}_3 \\ 1 \end{pmatrix} \right]^T = \xi \mathbf{A} \begin{pmatrix} \overline{\mathbf{X}}_3 \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{\mathbf{X}}_3 \\ 1 \end{pmatrix}^T \mathbf{A}^T \xi^T = \xi \mathbf{B} \xi^T =$$

$$= \text{diag}[\sigma_d^2 B_{ii}, \dots, \sigma_\beta^2 B_{jj}, \sigma_\varepsilon^2 B_{jj}, \dots, i=1, \dots, n, j=1, \dots, h]; \quad \mathbf{B} = \mathbf{A} \overline{\mathbf{R}}_x \mathbf{A}^T;$$

$\overline{\mathbf{R}}_x = \mathbf{R}_x(\overline{\mathbf{X}}_3) = \text{diag}[\overline{x_0^2}, \overline{y_0^2}, \dots, \overline{\alpha_s^2}, 1]$ - корреляционная матрица вектора $(\mathbf{X}_3 \ 1)^T$, получаемая на основе статистических сведений об оцениваемых параметрах.

Статистический алгоритм не требует предварительной оценки координат и параметров движения наблюдаемого объекта. Таким образом, применение статистического алгоритма уменьшает вычислительные затраты на 50% по сравнению с модифицированным и квазиоптимальным алгоритмами.

Для оценивания эффективности полученных оценок $\mathbf{X}_3^*$, найдена граница Крамера-Рао для дисперсии $\mathbf{D}_{x_3}$ ошибки измерения вектора $\mathbf{X}_3$ по наблюдаемым данным (7):

$$\mathbf{D}_{x_3} \geq \mathbf{D}_0 = (\mathbf{g}_3^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{g}_3)^{-1}, \quad (15)$$

где $D_x^0 = \mathbf{D}_0(1,1)$; $D_y^0 = \mathbf{D}_0(2,2)$; $D_z^0 = \mathbf{D}_0(3,3)$ - границы Крамера-Рао для оценок координат в декартовой системе.

На рисунке 5 приведены зависимости дисперсий погрешности оценивания координаты по оси x от погрешности измерения разности расстояния σ_d , полученных методом МНК (9), а также полученных методом максимального правдоподобия (МП) модифицированным (11), квазиоптимальным (13), статистическим (14) алгоритмами и границы Крамера-Рао (15) для варианта движения объекта, определяемые степенью K полинома (1) при криволинейном ускоренном движении объекта, $K=2$, $S=3$, и уравнении движения объекта (1):

$$x_{M/i} = 30 + 0,7t_i + 0,01t_i^2; \quad y_{M/i} = 30 + 0,3t_i + 0,01t_i^2; \quad z_{M/i} = 20 + 0,1t_i; \quad t_i = 1, \dots, n.$$

Траектория движения пункта приема T_2 выражается полиномом:

$$x_{2/i} = 0 + 20 \cos(2t_i \pi / n); \quad y_{2/i} = 0 + 20 \sin(2t_i \pi / n); \quad z_{2/i} = 10; \quad t_i = 1, \dots, n. \quad (16)$$

Погрешности измерения угловых координат $\sigma_\beta = 0,2^\circ$; $\sigma_\varepsilon = 0,1^\circ$. Число измерений пункта приема T_1 равно $n = 30$. На интервале наблюдения $(0, t_n)$ полагается число измерений пункта приема T_2 с периодом $2(t_i - t_{i-1})$ равно $h = 15$.

Полагается, что элементы вектора $\mathbf{X}_3$ имеют равномерное распределение на априорном интервале:

$$x_0, y_0 \in (0, R_{\max}) = (0 \div 400) \text{ км};$$

$$z_0 \in (0, H_{\max}) = (0 \div 30) \text{ км};$$

$$a_1, b_1, c_1 \in (V_{\min}, V_{\max}) = (30 \div 330) \text{ м/с};$$

$$a_2, b_2, c_2 \in (W_{\min}, W_{\max}) = (-2 \div 3) \text{ м/с}^2.$$

Видно, что метод МНК дает худший результат по точности оценивания координат по сравнению с остальными алгоритмами. При погрешности измерения $\sigma_d = 9$ м, $\sigma_\beta = 0,2^\circ$, $\sigma_\varepsilon = 0,1^\circ$ получена оценка координат по оси x методом МНК с погрешностью 328,6 м, а модифицированным и квазиоптимальным и статистическим алгоритмами с погрешностью 194,9 м. Таким образом, применение предлагаемых алгоритмов позволяет уменьшить погрешность оценивания координат на 40,7 % по сравнению с методом МНК.

В третьем разделе на основе получения предварительной информации о координатах и параметрах движения маневрирующего объекта рассмотрены гибридные алгоритмы TDOA-AOA оптимальной оценки координат маневрирующего объекта. Пространственное расположение объекта и пунктов приема для реализации алгоритма отображено на рисунке 6. При движении пункта приема T_2 и объекта M в каждый момент времени t_i , $i = 1, 2, \dots$, измеряются величины: разность расстояния $d_i = r_{2/i} - r_{1/i}$, а также угловые координаты $\beta_{1/i}, \varepsilon_{1/i}$ объекта.

Система уравнений для описания пространственных параметров маневрирующего объекта в прямоугольных координатах выражается в векторном виде:

$$\mathbf{X}_{4/i} = \Psi \mathbf{X}_{4/i-1} + \mathbf{G} \boldsymbol{\eta}_i, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (17)$$

где $\mathbf{X}_{4/i} = [x_{M/i}, y_{M/i}, z_{M/i}, a_{1/i}, b_{1/i}, c_{1/i}, a_{2/i}, b_{2/i}, c_{2/i}]^T$ - неизвестный вектор; $\boldsymbol{\eta}_i = [\eta_{a/i}, \eta_{b/i}, \eta_{c/i}]^T$ - случайный вектор; $\eta_{a/i}, \eta_{b/i}, \eta_{c/i}$ - случайные возмущения

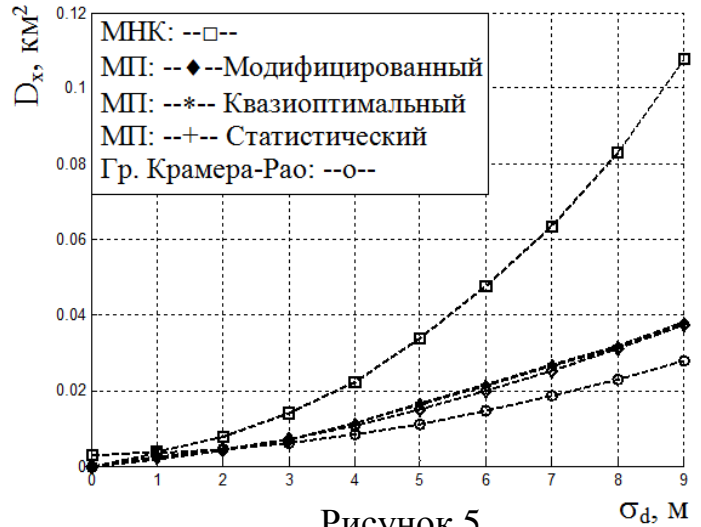


Рисунок 5

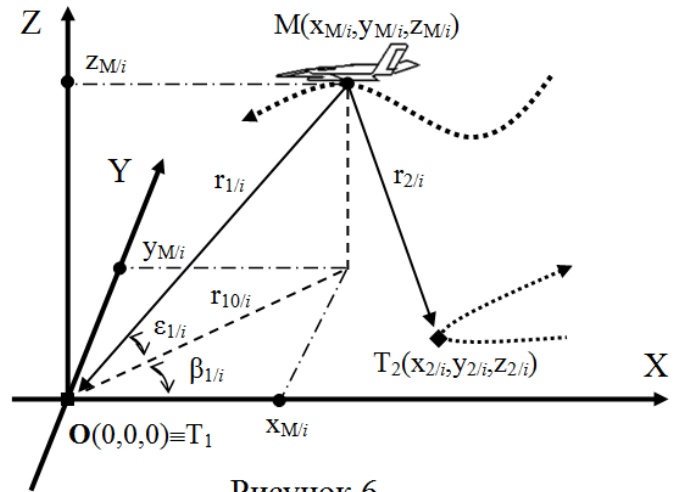


Рисунок 6

траектории движения объекта, которые имеют нормальное распределение $N(0, \sigma_a^2)$, $N(0, \sigma_b^2)$, $N(0, \sigma_c^2)$, здесь σ_a^2 , σ_b^2 , σ_c^2 - дисперсии возмущений;

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & T^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & T^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 & T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} T^2/4 & 0 & 0 \\ 0 & T^2/4 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/4 \\ T/2 & 0 & 0 \\ 0 & T/2 & 0 \\ 0 & 0 & T/2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T = t_i - t_{i-1}.$$

Связь между координатами объекта $x_{M/i}$, $y_{M/i}$, $z_{M/i}$ и измеренными величинами d_i , $\beta_{1/i}$, $\varepsilon_{1/i}$ выражается системой нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} d_i = \sqrt{(x_{M/i} - x_{2/i})^2 + (y_{M/i} - y_{2/i})^2 + (z_{M/i} - z_{2/i})^2} - \sqrt{x_{M/i}^2 + y_{M/i}^2 + z_{M/i}^2}, \\ \beta_{1/i} = \arctg \frac{y_{M/i}}{x_{M/i}}, \quad \varepsilon_{1/i} = \arctg \frac{z_{M/i}}{\sqrt{x_{M/i}^2 + y_{M/i}^2}}, \\ i = 1, 2, \dots, \end{cases}$$

или в векторном виде:

$$\mathbf{Y}_i = F(\mathbf{X}_{4/i}), \quad (18)$$

где $\mathbf{Y}_i = [d_i, \beta_{1/i}, \varepsilon_{1/i}]^T$ - измеренный вектор. При действии случайных ошибок измерений $\xi_{d/i}$, $\xi_{\beta/i}$, $\xi_{\varepsilon/i}$, система уравнений (18) имеет вид:

$$\mathbf{Y}_i = F(\mathbf{X}_{4/i}) + \xi_i, \quad (19)$$

где $\xi_i = [\xi_{d/i}, \xi_{\beta/i}, \xi_{\varepsilon/i}]^T$ - случайный вектор ошибки измерений.

Рекуррентный гибридный алгоритм TDOA-AOA оптимальной оценки пространственных координат и параметров движения маневрирующего объекта представлен системой уравнений:

$$\mathbf{X}_{4/i}^* = \Psi \mathbf{X}_{4/i-1}^* + \mathbf{K}_i [\mathbf{Y}_i^* - F(\mathbf{X}_{4/i-1}^*)], \quad (20)$$

$$\mathbf{V}_{i-1} = \Psi \Phi_{i-1} \Psi^T + \mathbf{G} \mathbf{R} \mathbf{G}^T,$$

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{V}_{i-1} \mathbf{H}_i^T [\mathbf{H}_i \mathbf{V}_{i-1} \mathbf{H}_i^T + \mathbf{W}]^{-1},$$

$$\Phi_i = \mathbf{V}_{i-1} - \mathbf{V}_{i-1} \mathbf{H}_i^T [\mathbf{H}_i \mathbf{V}_{i-1} \mathbf{H}_i^T + \mathbf{W}]^{-1} \mathbf{H}_i \mathbf{V}_{i-1},$$

где $\mathbf{W} = \text{diag}[\sigma_d^2, \sigma_\beta^2, \sigma_\varepsilon^2]$ - диагональная корреляционная матрица случайного вектора ошибок измерений η_i ; $\mathbf{R} = \text{diag}[\sigma_a^2, \sigma_b^2, \sigma_c^2]$ - диагональная корреляционная матрица случайного вектора возмущений траектории ξ_i ;

$\Phi_0 = (\mathbf{X}_{4/0}^* - \mathbf{X}_{4/0})(\mathbf{X}_{4/0}^* - \mathbf{X}_{4/0})^T$ - диагональная корреляционная матрица, которая характеризует начальные случайные значения $\mathbf{X}_0^*$; $\mathbf{H}_i = [\partial F(\mathbf{X})/\partial \mathbf{X}]_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_{4/i}^*}$.

Для получения эффективной оценки координат маневрирующего объекта в условиях неполной априорной информации о параметрах движения объекта применим прямое решение системы нелинейных уравнений (18) в каждой точке измерений $i = 1, 2, \dots$. Нерекуррентный гибридный алгоритм TDOA-AOA эффективного оценивания координат маневрирующего объекта имеет вид:

$$\mathbf{m}_{5/i} = \mathbf{g}_{5/i} \mathbf{X}_{5/i}, \quad (21)$$

где $\mathbf{X}_{5/i} = (x_{M/i}, y_{M/i}, z_{M/i})^T$ - неизвестный вектор, $\mathbf{m}_{5/i} = [(L_i^2 - d_i^2) \cos \varepsilon_{1/i}, 0, 0]^T$ - измеренный вектор,

$$\mathbf{g}_{5/i} = \begin{bmatrix} 2(x_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} + d_i \cos \beta_{1/i}) & 2(y_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} + d_i \sin \beta_{1/i}) & 2z_{2/i} \cos \varepsilon_{1/i} \\ \sin \beta_{1/i} & -\cos \beta_{1/i} & 0 \\ tg \varepsilon_{1/i} & 0 & -\cos \beta_{1/i} \end{bmatrix}.$$

При действии случайных ошибок измерений, алгоритм (21) выражается в приближенном виде: $\mathbf{m}_{5/i} \approx \mathbf{g}_{5/i} \mathbf{X}_{5/i} + \boldsymbol{\theta}_{5/i}$, здесь $\boldsymbol{\theta}_{5/i} = [\eta_{d/i}(2r_{1/i} + 2d_i) \cos \varepsilon_{1/i}, \eta_{\beta/i}(r_{1/i} \cos \varepsilon_{1/i}), \eta_{\varepsilon/i}(r_{1/i} \cos \beta_{1/i} / \cos \varepsilon_{1/i})]^T$ - случайный вектор ошибок измерений. Тогда, нерекуррентный гибридный алгоритм TDOA-AOA оценивания координат методом МНК по наблюдаемым данным (21) имеет вид:

$$\mathbf{X}_{5/i}^* = [\mathbf{g}_{5/i}^T \mathbf{g}_{5/i}]^{-1} \mathbf{g}_{5/i}^T \mathbf{m}_{5/i}^*, \quad (22)$$

где $\mathbf{g}_{5/i}^* = \mathbf{g}_{5/i}(d_i^*, \beta_{1/i}^*, \varepsilon_{1/i}^*)$, $\mathbf{m}_{5/i}^* = \mathbf{m}_{5/i}(d_i^*, \beta_{1/i}^*, \varepsilon_{1/i}^*)$.

Для достижения более высокой точности оценивания координат маневрирующего объекта предлагается комбинация рекуррентного (20) и нерекуррентного (22) гибридных алгоритмов TDOA-AOA. Совместное использование этих алгоритмов позволяет сочетать их достоинства такие, как уменьшение влияния неточности начальной оценки, высокая устойчивость работы алгоритма фильтрации и в результате более высокая точность определения координат. Комплексированный гибридный алгоритм TDOA-AOA имеет вид:

$$\begin{cases} \mathbf{m}_{4/i} = \mathbf{I}_{9 \times 9} \mathbf{X}_{4/i} + \boldsymbol{\theta}_{4/i} \\ \mathbf{m}_{5/i} = [\mathbf{g}_{5/i} \ \mathbf{0}_{3 \times 6}] \mathbf{X}_{4/i} + \boldsymbol{\theta}_{5/i} \text{ откуда следует } \mathbf{m}_{6/i} = \mathbf{g}_{6/i} \mathbf{X}_{4/i} + \boldsymbol{\theta}_{6/i}, \\ i = 0, 1, \dots, \end{cases} \quad (23)$$

где $\mathbf{m}_{4/i} = \mathbf{X}_{4/i}^*$; $\boldsymbol{\theta}_{4/i}$ - случайный вектор ошибок измерений; $\mathbf{m}_{6/i} = [\mathbf{m}_{4/i}, \mathbf{m}_{5/i}]^T$ - измеренный вектор; $\boldsymbol{\theta}_{6/i} = [\boldsymbol{\theta}_{4/i}, \boldsymbol{\theta}_{5/i}]^T$; $\mathbf{g}_{6/i} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{9 \times 9} \\ \mathbf{g}_{5/i} \ \mathbf{0}_{3 \times 6} \end{bmatrix}_{12 \times 9}$ - измеренная матрица.

Структурная схема устройства, реализующего комплексированный гибридный алгоритм TDOA-AOA оптимального оценивания пространственных координат и параметров движения маневрирующего объекта, приведена на рисунке 7.

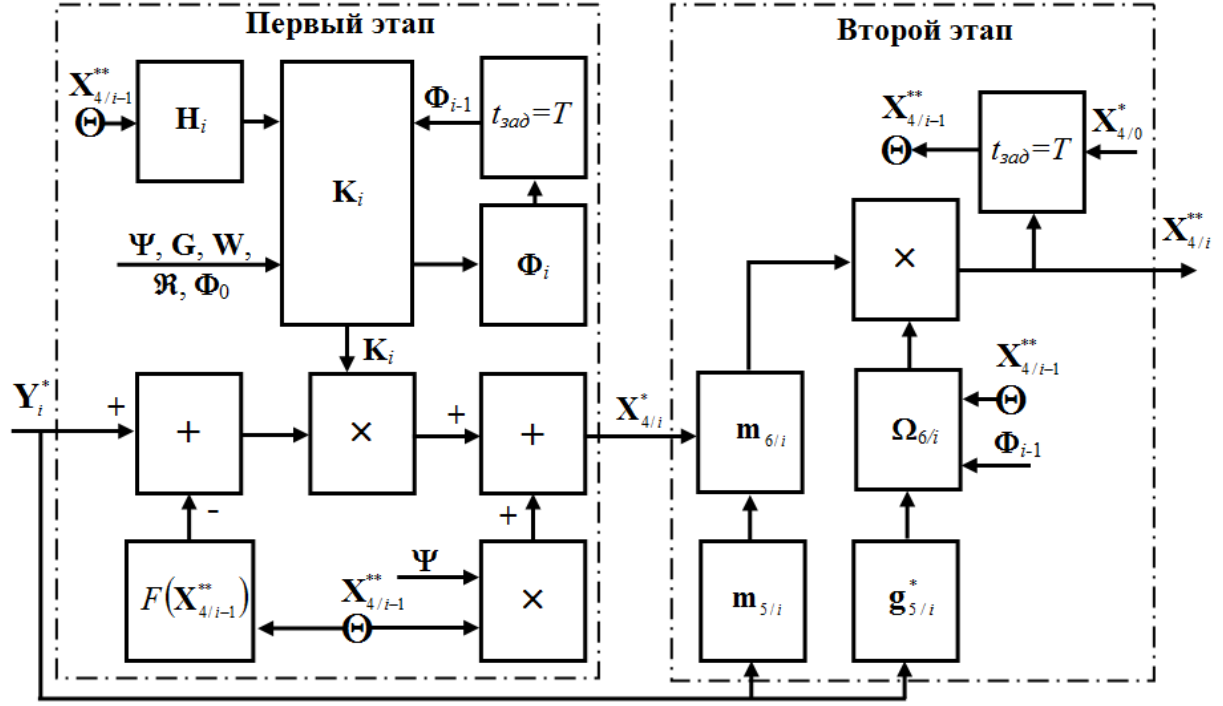


Рисунок 7

Теоретический алгоритм. Предполагается, что для вычисления матриц преобразования используются точные значения d_i , $\beta_{1/i}$, $\varepsilon_{1/i}$ и $r_{1/i}$. Тогда, оптимальная оценка координат методом максимального правдоподобия определяется уравнением:

$$\mathbf{X}_{4/i} = \mathbf{\Omega}_{6/i} \mathbf{m}_{6/i}, \quad (24)$$

где $\mathbf{\Omega}_{6/i} = [\mathbf{g}_{6/i}^T \mathbf{R}_{6/i}^{-1} \mathbf{g}_{6/i}]^{-1} \mathbf{g}_{6/i}^T \mathbf{R}_{6/i}^{-1}$, $\mathbf{R}_{6/i} = \mathbf{\theta}_{6/i} \mathbf{\theta}_{6/i}^T = \text{diag}[\Phi_i(1,1), \dots, \Phi_i(9,9), 4\sigma_d^2(r_{1/i} + d_i)^2, \cos^2 \varepsilon_{1/i}, \sigma_\beta^2(r_{1/i} \cos \varepsilon_{1/i})^2, \sigma_\varepsilon^2(r_{1/i} \cos \beta_{1/i} / \cos \varepsilon_{1/i})^2]$.

Реализуемый алгоритм. Для получения практически реализуемой оценки координат маневрирующего объекта с использованием наблюдений (23) при вычислении $\mathbf{g}_{6/i}$, $\mathbf{g}_{6/i}$ и $\mathbf{R}_{6/i}$ заменим точные величины d_i , $\beta_{1/i}$, $\varepsilon_{1/i}$ и $r_{1/i}$ полученными на первом этапе оценками d_i^* , $\beta_{1/i}^*$, $\varepsilon_{1/i}^*$, а также вычисленным на их основе значением $r_{1/i-1}^{**}$. Тогда можно использовать алгоритм квазиоптимальной оценки координат, полученный модифицированным методом максимального правдоподобия:

$$\mathbf{X}_{4/i}^{**} = \mathbf{\Omega}_{6/i}^* \mathbf{m}_{6/i}^*. \quad (25)$$

где $\mathbf{\Omega}_{6/i}^* = \mathbf{\Omega}_{6/i}(d_i^*, \beta_{1/i}^*, \varepsilon_{1/i}^*, r_{1/i}^*) = [\mathbf{g}_{6/i}^{*T} (\mathbf{R}_{6/i}^*)^{-1} \mathbf{g}_{6/i}^*]^{-1} \mathbf{g}_{6/i}^{*T} (\mathbf{R}_{6/i}^*)^{-1}$; $\mathbf{R}_{6/i}^* = \text{diag} \left[\Phi_{i-1}(1,1), \dots, \Phi_{i-1}(9,9), 4\sigma_d^2(r_{1/i-1}^{**} + d_i^*)^2, \cos^2 \varepsilon_{1/i}^*, \sigma_\beta^2(r_{1/i-1}^{**} \cos \varepsilon_{1/i}^*)^2, \sigma_\varepsilon^2 \left(r_{1/i-1}^{**} \frac{\cos \beta_{1/i}^*}{\cos \varepsilon_{1/i}^*} \right)^2 \right]$.

На рисунке 8 приведены зависимости от времени измерения i среднеквадратических отклонений оценок координат, полученных рекуррентным (20), нерекуррентным (22), комплексированными гибридными алгоритмами TDOA-AOA - теоретическим алгоритмом (24) и реализуемым алгоритмом (25). Движение пункта приема T_2 задано уравнением (16).

Погрешность измерений $\sigma_d = 9 \text{ м}$, $\sigma_\beta = 0,3^\circ$, $\sigma_\varepsilon = 0,1^\circ$. Координаты объекта M определяются уравнением (17) с параметрами: $\mathbf{X}_{4/0} = [70 \text{ км}; 70 \text{ км}; 20 \text{ км}; 0,7 \text{ км/с}; 0,3 \text{ км/с}; 0,01 \text{ км/с}; 0,03 \text{ км/с}^2; 0,03 \text{ км/с}^2; 0,01 \text{ км/с}^2]$. Погрешность

возмущений траектории $\sigma_a = 2 \text{ м/с}^2$, $\sigma_b = 2 \text{ м/с}^2$, $\sigma_c = 1 \text{ м/с}^2$, $T = 0,2 \text{ с}$.

Из полученных результатов моделирования на рисунке 8 видно, что при начальном расстоянии $r_{1/0} = 100 \text{ км}$ отклонение начальной оценки $\delta_0 = \sqrt{D_0}/r_{1/0} = 0,5$. В момент времени $t_{10} = 10T$ получим оценку координат рекуррентного гибридного алгоритма TDOA-AOA

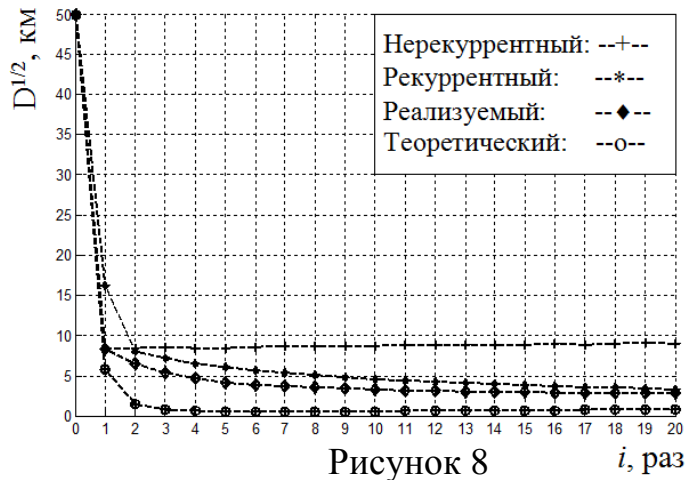


Рисунок 8

с относительной ошибкой оценивания координат $\delta_{10} = \sqrt{D_{10}}/r_{1/0} = 0,047$, а реализуемым алгоритмом с ошибкой $\delta_{10} = 0,0336$. Таким образом, применение реализуемого комплексированного гибридного алгоритма TDOA-AOA уменьшает относительную ошибку оценивания координат в 1,4 раза (28,5%) по сравнению с рекуррентным гибридным алгоритмом TDOA-AOA.

В диссертации разработан вариант технической реализации комплексированного гибридного алгоритма TDOA-AOA на отладочной плате микросхемы Virtex-II Pro XC2VP30-4FF1152C, реализующий параллельную организацию процесса вычисления для уменьшения вычислительных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом исследований, проведенных в диссертационной работе, является разработка и исследование гибридных алгоритмов TDOA-AOA при применении пассивной двухпозиционной РТС с неподвижным и подвижным пунктами приема для повышения точности оценивания координат источников радиоизлучения при действии случайных ошибок измерений. В результате выполнения диссертационного исследования получены следующие результаты:

1. Предложена эффективная пространственная структура пассивной двухпозиционной РТС определения местоположения источников радиоизлучения при применении одного подвижного и одного неподвижного пунктов приема, когда подвижный пункт приема движется по траектории окружности, а другой пункт приема с пунктом центральной обработки информации неподвижен. Пассивная подвижная двухпозиционная РТС значительно проще в технической реализации, сохраняет преимущества пассивной многопозиционной РТС, обладает более высокой маневренностью, помехозащищенностью, что позволяет устранить недостатки пассивной многопозиционной РТС с фиксированной базой.

2. Обоснован триангуляционный алгоритм (АОА) определения координат источника радиоизлучения в условиях измерения только угловых координатах

объекта. Проведен анализ триангуляционного алгоритма относительно различных вариантов движения объекта, показавший, что результат определения координат подвижного объекта триангуляционным алгоритмом зависит только от характера движения подвижного пункта приема и не зависит от вида движения объекта.

3. Обоснован гиперболический алгоритм (TDOA) определения координат источника радиоизлучения в условиях измерения только разностей расстояния от объекта до пунктов приема. Проведен анализ гиперболического алгоритма относительно различных вариантов движения объекта, показавший, что результат определения координат подвижного объекта гиперболическим алгоритмом зависит только от характера движения подвижного пункта приема, не зависит от вида движения объекта.

4. Разработан гибридный алгоритм TDOA-AOA определения координат источника радиоизлучения в условиях, когда измеряются разности расстояния от объекта до пунктов приема, а также на этом же интервале времени в другие моменты времени с помощью неподвижного пункта приема на земле измеряются угловые координаты объекта. Проведен анализ гибридного алгоритма TDOA-AOA относительно различных вариантов движения объекта, показавший, что результат определения координат подвижного объекта гибридным алгоритмом TDOA-AOA зависит только от характера движения подвижного пункта приема, не зависит от вида движения объекта.

5. Предложены алгоритмы статистического оценивания, обеспечивающие уменьшение погрешности определения координат источника радиоизлучения на $(19,1 \div 40,7)\%$, на основе гибридного алгоритма TDOA-AOA и методов статистического оценивания наименьших квадратов, максимального правдоподобия при действии случайных ошибок измерений.

6. Разработан статистический алгоритм квазиоптимальной оценки координат источника радиоизлучения в предположении, что статистические параметры движения объекта известны, обеспечивающий уменьшение вычислительных затрат на 50% в условиях минимально необходимых априорных сведений.

7. Предложен рекуррентный гибридный алгоритм TDOA-AOA оптимальной оценки пространственных координат и сопровождения траектории маневрирующего источника радиоизлучения на основе расширенного фильтра Калмана при использовании модели измерений координат объекта одним подвижным и неподвижным пунктами приема в сферической системе координат.

8. Разработан нерекуррентный гибридный алгоритм TDOA-AOA эффективной оценки координат источника радиоизлучения в условиях неполной априорной информации о параметрах движения объекта.

9. Разработан комплексированный гибридный алгоритм TDOA-AOA оптимальной оценки пространственных координат и сопровождения траектории маневрирующего источника радиоизлучения на основе комбинации рекуррентного и нерекуррентного гибридных алгоритмов TDOA-AOA, обеспечивающий уменьшение погрешности оценивания координат на 28,5% в

условиях действия случайных ошибок измерений, возмущений траектории объекта и неточности начальной оценки параметров движения объекта.

10. Предложен вариант технической реализации комплексированного гибридного алгоритма TDOA-AOA на отладочной плате микросхемы Virtex-II Pro XC2VP30-4FF1152C фирмы Xilinx, реализующий параллельную организацию процесса вычисления для уменьшения вычислительных затрат.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

1. Лыонг, Ч. В. Оценка точности местоположения источника излучения методом пассивной радиолокации / Ч. В. Лыонг // 42-я научно-техническая конференция. Тез. докл. - Рязань: РГРТУ, 2012. - С. 5-5.
2. Лыонг, Ч. В. Анализ точности определения местоположения подвижного источника радиоизлучения / Ч. В. Лыонг // Новые информационные технологии в научных исследованиях - НИТ-2012: Сб. тез. докл. - XVII всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов. - Рязань: РГРТУ, 2012. - С. 62-62.
3. Лыонг, Ч. В. Моделирование гиперболического алгоритма измерения координат источников излучения в пассивной радиолокации / Ч. В. Лыонг, Ю. Н. Паршин // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 6. - Рязань: РГРТУ, 2012. - С. 66-73.
4. Лыонг, Ч. В. Повышение точности оценивания координат маневрирующего источника радиоизлучения / Ч. В. Лыонг // Новые информационные технологии в научных исследованиях - НИТ-2013: Сб. тез. докл. - XVIII всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов. - Рязань: РГРТУ, 2013. - С. 46-47.
5. Лыонг, Ч. В. Моделирование триангуляционного алгоритма определения координат источника радиоизлучения / Ч. В. Лыонг // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Ю. Н. Паршина. - Рязань: РГРТУ, 2013. - С. 104-108.
6. Паршин, Ю. Н. Разработка гиперболического алгоритма определения координат источника радиоизлучения / Ю.Н. Паршин, Ч. В. Лыонг // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. - Рязань: РГРТУ, 2013, №1, вып.43. - С. 32-38.
7. Паршин, Ю. Н. Статистический синтез и анализ гибридного алгоритма определения координат источника радиоизлучения / Ю. Н. Паршин, Ч. В. Лыонг // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - Муром: ВлГУ, 2013, №1 (вып. 9). - С. 16-27.
8. Лыонг, Ч. В. Применение статистических оценок повышение точности оценивания координат источника радиоизлучения / Ч. В. Лыонг // Радиолокация и радиосвязь: Сб. тез. докл. - VII всероссийская научно-техническая конференция. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2013. - М.: ИРЭ, 2013. - С. 8-12.
9. Паршин, Ю. Н. Разработка комплексированного гибридного алгоритма TDOA+AOA оптимальной оценки координат маневрирующего источника радиоизлучения / Ю. Н. Паршин, Ч. В. Лыонг // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - Муром: ВлГУ, 2014, №2 (вып. 14). - С. 5-12.

Лыонг Чинь Ван

**ГИБРИДНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ
ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ
НЕПОДВИЖНОГО И ПОДВИЖНОГО ПУНКТОВ ПРИЕМА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Отпечатано ГНУ ВНИМС,
Рязань, Щорса 38/11
Формат бумаги 60×84 1/16.
Печатных листов 1.
Заказ № Тираж 100 экз.

31 марта 2014 г.