

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ В СЕТЯХ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА

С.В. Дворников^{1*}, О.Г. Духовницкий², И.В. Федоренко³

¹Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

²Федеральное агентство связи (Россвязь),
Москва, 109289, Российская Федерация

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

*Адрес для переписки: practicdsv@yandex.ru

Информация о статье

УДК 621.396

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Дворников С.В., Духовницкий О.Г., Федоренко И.В. Динамическая модель вектора состояний подвижных объектов при их позиционировании // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 3. С. 51–59.

Аннотация: *Представлены данные моделирования и результаты теоретического исследования по разработке частных моделей, обеспечивающих позиционирование подвижных объектов в сетях широкополосного доступа. Приведены основные этапы разработки динамической модели вектора состояния подвижных объектов, базирующейся на методы пассивной локации. Показаны результаты разработки аналитического аппарата и проеденного моделирования, подтверждающие состоятельность подхода, обеспечивающего точность позиционирования подвижных объектов в пределах 10 метров.*

Ключевые слова: *позиционирование подвижных объектов, динамическая модель вектора состояния, обработка радиотехнической информации, методы пассивной локации.*

Введение

В настоящее время эффективное решение задач логистики невозможно без знаний о местонахождении контролируемых подвижных объектов. Для этой цели широко используют различные радионавигационные системы.

Однако являясь глобальными, они достаточно уязвимы к преднамеренным помехам как случайного, так и преднамеренного характера, о чем неоднократно отмечалось в различных источниках [1–3]. Следовательно, необходим поиск рациональных решений указанной проблемы. Особенно она актуально в местах массового скопления подвижных объектов (крупные склады, строительные площадки, порты, торговые ярмарки, для силовых структур – места ведения боевых действий и т. д.). При этом в качестве объектов могут выступать как транспортные средства, так и отдельные сотрудники, при их оснащении соответствующим оборудованием.

Один из продуктивных подходов для этих случаев видится в применении методов геолокации, базирующихся на обработке сигналов локальных сетей широкополосного доступа, которые, как правило, организуют в рассмотренных ситуациях [4–6].

Вместе с тем, анализ существующих решений показывает, что среди причин, сдерживающих их активное практическое применение, является отсутствие в достаточной степени проработанного научно-методического аппарата (НМА), позволяющего, в частности, адекватно описывать динамические модели вектора состояний подвижных объектов для указанных выше условий [7], а также эффективных алгоритмов реализации отдельных процедур поиска [8].

В связи с этим, настоящую статью следует рассматривать именно в контексте развития одного из направлений решения рассматриваемой проблематики.

Постановка и формализация частных задач

Решение сформулированной задачи видится в разработке нескольких частных моделей, позволяющих в своей совокупности для движущегося объекта получить оценки координат по результатам обработки сигналов от нескольких независимых источников [7]. При этом в качестве методологической основы для их разработки предлагается определить НМА, широко используемый при обнаружении и сопровождении радиотехнических целей [9, 10].

С учетом сделанных замечаний, формулировку частных задач по разработке моделей представим в следующей редакции: 1) модель технологических операций обработки радиотехнической информации; 2) модель первичной обработки радиотехнической информации; 3) динамическая модель вектора состояний подвижных объектов и способ оценивания их координат.

Рассматривая специфику используемого тезауруса из теорий радионавигации и пассивной локации, определимся, что в дальнейшем под отдельной радиотехнической системой (РТС) будем понимать совокупность радиооборудования, установленного в каждой из точек доступа широкополосных сетей типа *Wi-Fi* или *WiMAX*, в том числе и на подвижном объекте. При этом полагаем, что подвижный объект может оснащаться аппаратурой для обработки независимо как сигналов *Wi-Fi*, так и сигналов *WiMAX*. В этом случае будем считать, что подвижный объект оборудован двумя

независимыми РТС. А каждый из источников сигналов РТС определим как источник радиотехнической информации (РТИ). Тогда принцип позиционирования объектов графически можно интерпретировать в соответствии с рисунком 1.

Очевидно, что в условиях нарушения работы глобальных навигационных систем позиционирование подвижных объектов относительно точек доступа указанных систем будет возможно только в случае их точной топогеодезической привязки на местности (рисунок 1). Поскольку позиционирование подвижного объекта будет проводиться уже в системе координат x - y , сформированной на основе относительно каждого из источников РТИ, размещаемых на точках доступа обслуживаемой РТС [7].

Учитывая, что при движении объекта будут проводиться многократные измерения сигналов, поступающих от различных РТИ, то в качестве НМА для разработки моделей целесообразно рассматривать аналитику, предложенную в [11].

В общем случае, согласно [7], привязка объектов может осуществляться: по уровню сигналов беспроводного доступа на подвижном объекте; по номеру соты *Cell_ID*, образуемой точкой доступа в сети беспроводного доступа; по IP-адресу бортового компьютера подвижного объекта; по радиосигналам независимых РТС, в том числе и глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС; по результатам тригонометрической привязки.

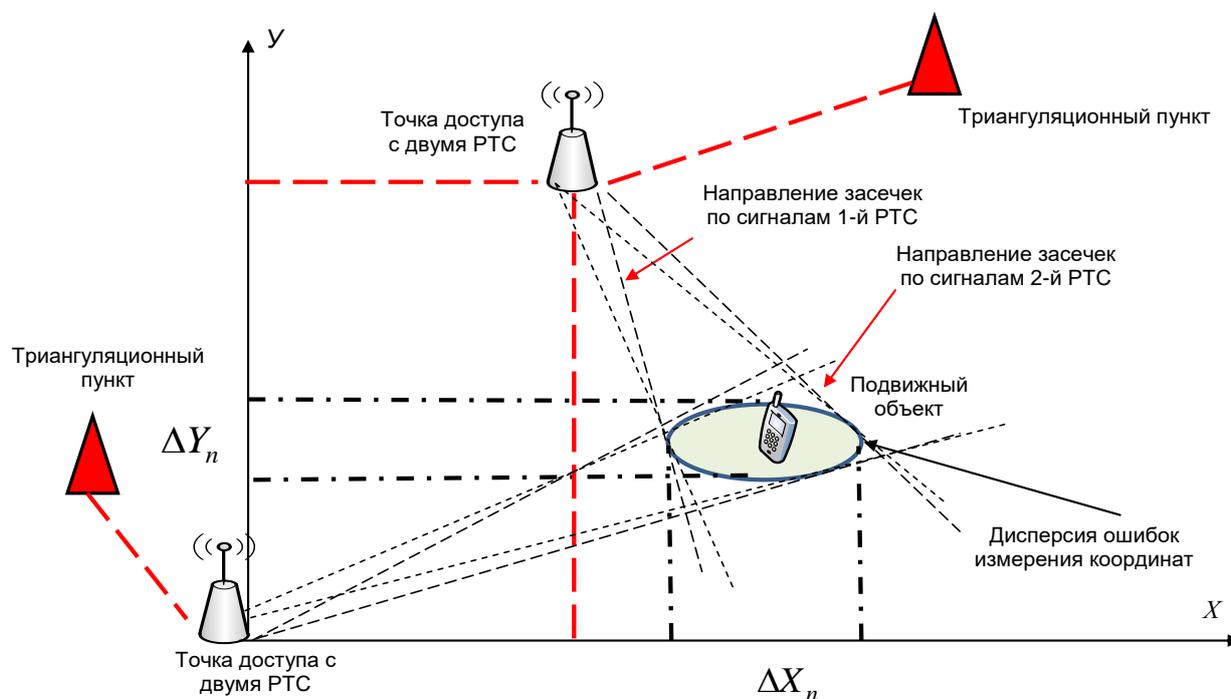


Рис. 1. Принцип позиционирования подвижного объекта относительно точек доступа с известными параметрами и двумя РТС

Для этого на подвижном объекте достаточно установить необходимое оборудование и специализированное программное обеспечение, позволяющее определять координаты по результатам обработки сигналов методами координатометрии [12, 13]. Однако наиболее интересным видится подход, базирующийся на формировании модели вектора состояний подвижного объекта, получаемого в результате последовательного приема сигналов РТС, результативность которого подтверждается в [9, 10].

Рассмотренные обстоятельства определяют необходимость разработки именно динамической модели вектора состояний подвижных объектов [7], а на её основе – способа оценивания их координат. Такой подход позволяет итерационно уточнять истинное значение координат, получаемых на каждом этапе их измерения по мере накопления результатов измерений и последующей статистической обработки. В этом случае система обработки должна будет представлять собой совокупность элементарных взаимосвязанных подсистем.

Модель технологических операций обработки РТИ

Учитывая, что модель вектора состояний является элементом НМА пассивной локации, в дальнейшем необходимо исходить из того, что координатная информация будет представлять собой результаты обработки, так называемой, радиотехнической информации, включающей данные о состоянии объекта, получаемых из сигналов, принимаемых от источников РТС.

Следовательно, первоначально необходимо формализовать процессы обработки РТИ на уровне следующих функционально законченных операций.

1) Обнаружение полезных сигналов. Задача обнаружения сигналов состоит в вынесении однозначного решения: наличие сигнала от РТС ($S > 0$), либо его отсутствие ($S \sim 0$). Оптимальность решения задачи обнаружения сигналов обеспечивается применением методов статистической радиотехники [14], направленных на минимизацию числа ошибочных решений.

2) Определение (единичное измерение) координат (радиотехнических отметок). Реализация указанной операции предполагает получение статистической оценки координат подвижного объекта (либо прямоугольных, либо географических). В любом случае привязка должна осуществляться относительно пунктов (точек) доступа с заранее известными координатами, полученными, например, на основе топогеодезической привязки. Оптимальность решения задачи оценки параметров понимается в смысле максимального приближения полученного результата к его истинному зна-

чению (в смысле минимизации ошибок единичных измерений) [15].

Совокупность операций 1) и 2), выполняемых на основе обработки сигналов, полученных в каждом этапе приема РТИ от РТС, в [7, 9] определена как первичная обработка радиотехнической информации (ПОРТИ).

3) Обнаружение траектории движения объекта по совокупности радиотехнических отметок, полученных в результате обработки РТИ, получаемых от независимых РТС в ходе выполнения 1-го и 2-го этапов [10].

4) Траекторное сопровождение объекта. В процессе сопровождения объекта вдоль траектории его движения необходимо при каждом измерении РТИ отбирать такие радиотехнические отметки, которые позволят уточнить параметры самой траектории и текущие координаты объекта.

5) Траекторные расчеты должны проводиться по каждому из находящихся на сопровождении подвижных объектов, в интересах определения их координат. К ним также следует отнести процедуры сглаживания и прогнозирования (экстраполяция) параметров траекторий на заданных участках.

Операции 3, 4 и 5 должны выполняться периодически на основе радиотехнических отметок, полученных в процессе ПОРТИ. Совокупность указанных операций в [7, 9] определена как вторичная обработка радиотехнической информации (ВОРТИ).

6) Заключительная обработка представляет собой объединение РТИ, поступающей от нескольких источников (отдельных РТС или групп РТС) по подвижному объекту, находящемуся в области перекрытия их зон ответственности. Указанные операции в [7, 9] определены как третичная обработка радиотехнической информации (ТОРТИ). В процессе объединения полученной информации должны решаться задачи отождествления (идентификации) траекторий, полученных от нескольких РТС по одному и тому же подвижному объекту, а также проводится вычисление параметров объединенных указанным образом траекторий.

Совокупность рассмотренных процедур представим в виде поэтапной модели технологических операций обработки РТИ, структура которой изображена на рисунке 2.

В соответствии с предложенной структурой модели, в качестве исходных данных выступают сигналы от независимых РТС, размещенных на пунктах доступа (1 этап).

По результатам обработки сигналов формируется координатная информация о местоположении подвижного объекта независимо по каждой РТС (2 этап).

Поскольку получаемая координатная информация имеет определенную погрешность для каждого момента измерений (получения радиотехнических отметок), то формируемая на ее основе траектория движения объекта независимо по каждой из РТС является приближенной (3 этап).

Поэтому, по результатам траекторных расчетов происходит уточнение местоположения объекта на моменты получения им радиотехнических отметок (т. е. итерационно снижается ошибка измерения) и осуществляется сопровождение объекта вдоль траектории его движения. Операции проводятся независимо для каждой РТС (4 этап).

Для дальнейшего уточнения значений координат расположения объекта производится совместная обработка траекторной информации, получаемой от независимых РТС (5 этап).

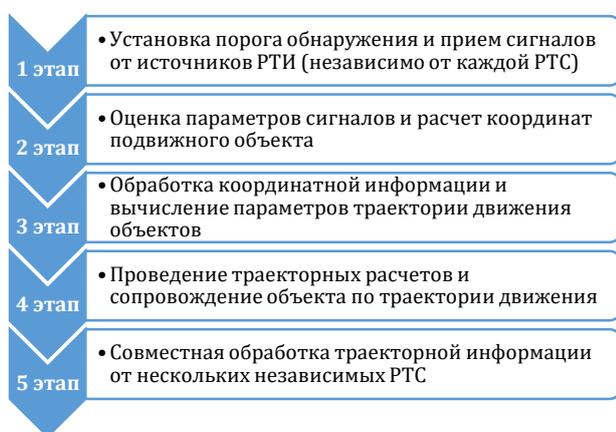


Рис. 2. Структура модели технологических операций обработки радиотехнической информации

Предлагаемая модель достаточно полно отображает процедуры формирования вектора состояния подвижного объекта, на основе которого происходит вычисление траектории его движения. При этом сами траекторные расчеты производят путем итерационного уточнения при каждом проводимом измерении.

Модель первичной обработки РТИ от одной РТС

Для более полного понимания сущности технологических процедур, составляющих ПОРТИ, предлагается их объединить в рамках следующей структурной модели, представленной на рисунке 3.

Особенность предлагаемой модели состоит в том, что в ней реализуются базовые методы цифровой обработки сигналов (ЦОС) (3 этап), для чего в ней предусмотрено выполнение операций дискретизации, квантования и кодирования сигналов, содержащих РТИ. Учитывая, что качество операций ЦОС определяется параметрами устройства аналого-цифрового преобразования, на 1 этапе предусмотрены процедуры выбора его разрядности. Таким образом, разработанная модель

представляет собой последовательность процедур приема сигнала и последующей ПОРТИ.

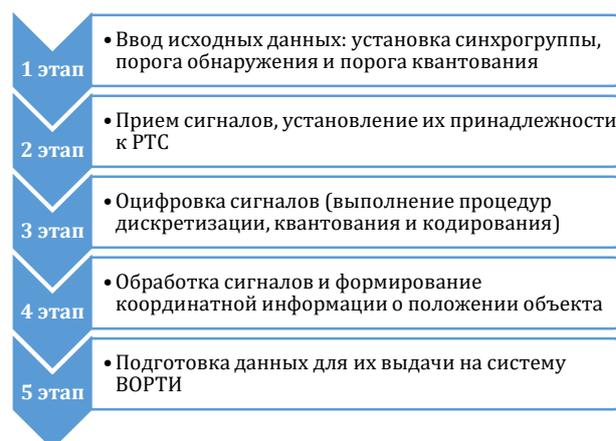


Рис. 3. Структура модели операций первичной обработки радиотехнической информации (ПОРТИ)

Работа модели начинается после установления факта обнаружения сигналов от нескольких радиотехнических устройств, расположенных в точках доступа. С этой целью на 1 этапе предусмотрены процедуры формирования дополнительных синхрогрупп. Указанная процедура позволяет отнести сигналы от различных источников РТИ при вычислении координатной информации об объекте.

Следует учесть, что функционирование модели становится возможной только в случае приема сигналов от нескольких источников РТИ. Именно тогда возможно дальнейшее проведение траекторных вычислений. Результатом работы модели является подготовка исходных данных для системы ВОРТИ. Заметим, что процедуры дискретного преобразования и кодирования сигналов являются согласующим звеном между аналоговым радиоприемным устройством подвижного объекта и цифровой системой обработки РТИ [16].

Динамическая модель вектора состояний подвижных объектов и способ оценивания их координат на этапе ВОРТИ, поступающей от одной РТС

Учитывая, что основу ПОРТИ представляют процедуры упорядочивания координатной информации [12], являющейся исходными данными для систем ВОРТИ, целесообразно разработать модель входного воздействия. С этой целью формализуем вектор состояния подвижного объекта в терминах методов пассивной радиолокации, согласно которым вектор состояния можно рассматривать как вектор сопровождения цели [9]. Другими словами, декомпозируем его отдельно по каждой из координат x и y .

В этом случае на выходе ВОРТИ будут формироваться оценочные значения каждой из координат x и y , представленные в виде векторов $\hat{x}(n)$ и $\hat{y}(n)$,

в которых элементами будут являться вычисленные значения, получаемые по результатам каждого измерения (получение радиотехнических отметок) на этапе ПОРТИ [10].

Рассмотрим этапы обработки на примере результатов оценивания координаты x подвижного объекта, формируемой по данным обработки сигналов от двух источников РТИ (см. рисунок 1), при условии установления синхронизации.

Допустим, что движение объекта описывается уравнением вида [7]:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t), \quad x(0) = \vec{x}_0, \quad (1)$$

где $x(t) = (x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots)^T$ – вектор состояния подвижного объекта размерностью $k \times 1$ (вектор значений РТИ), здесь x – текущее значение координаты, \dot{x} – скорость изменения текущего значения координаты, \ddot{x} – ускорение, с которым происходит текущее значение координаты; $A(t)$ – матрица коэффициентов дифференциального уравнения; t – знак транспонирования.

Учитывая, что все фиксируемые измерения поступают в систему их обработки последовательно с интервалом Δt в дискретные моменты времени $n \times \Delta t$, где n – порядковое значение времени измерения (далее по тексту – n), то модель движения объекта можно записать в приращениях [9]:

$$x(n) = \Phi(n)x(n-1), \quad x(0) = \vec{x}_0, \quad (2)$$

где $\Phi(n)$ – матрица перехода на один шаг размерностью $k \times k$.

Учитывая модель динамики объекта (2), а также то, что, как правило, в обработку из всего вектора состояния объекта $x(t) = (x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots)^T$ поступают лишь измеренные значения координаты x , уравнение наблюдения можно представить в виде:

$$u(n) = Cx(n) + f(n), \quad (3)$$

где $u(n)$ – измеренное значение координаты, представленное в виде вектора; C – матрица наблюдения размерностью $1 \times k$; $f(n)$ – вектор помехи (ошибки измерения), значения которого распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и матрицей дисперсии ошибок:

$$R(n) = M[f^2(n)] = D[f(n)].$$

Здесь M – символ математического ожидания, а D – дисперсии значения.

В соответствии с выражениями (2) и (3) модель входного воздействия дискриминатора следящего измерителя представим в виде матричной структуры (рисунок 4), здесь Z^{-1} – матрица обратных преобразований. Разработанная модель обеспечивает получение оптимальной оценки (с точки зрения минимума средней квадратичной ошибки оценивания) параметров вектора состояния (2) [16].

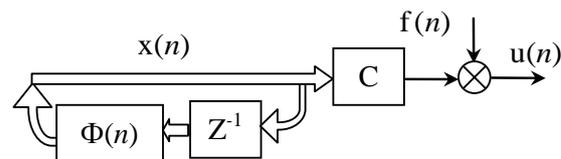


Рис. 4. Структура модели входного воздействия для системы ВОРТИ

Для рассматриваемого случая лучшим инструментом оптимизации является калмановская фильтрация [7, 17]:

$$\hat{x}(n) = \Phi(n)\hat{x}(n-1) + K(n)\Delta u(n), \quad (4)$$

$$\hat{x}(0) = \vec{x}(0), \Delta u(n) = u(n) - C\Phi\hat{x}(n-1), \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} P_3(n) &= \Phi(n)P_3(n-1)\Phi^T(n) + Q(n), P_3(0) = P_0; \\ K(n) &= P_3(n)C^T[C P_3(n)C^T + R(n)]^{-1}; \\ P(n) &= P_3(n) - K(n)C P_3(n), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $K(n)$ – $k \times 1$ весовая матрица; $\Delta u(n)$ – вектор невязки (в рассматриваемом случае вырожденный в скаляр); $P_3(n)$, $P(n)$ – $k \times k$ ковариационные матрицы ошибок экстраполяции и оценивания соответственно, а $R(n)$ – матрица дисперсии ошибок измерения (в рассматриваемом случае матрица вырожденная в скаляр).

Заметим, что для координаты u выражения, характеризующие ее оптимальную оценку, будут аналогичными, что позволяет соответственно записать:

$$\hat{y}(n) = \Phi(n)\hat{y}(n-1) + K(n)\Delta u(n), \quad (7)$$

$$\hat{y}(0) = \vec{y}(0), \Delta u(n) = u(n) - C\Phi\hat{y}(n-1). \quad (8)$$

Следует учесть, что размерность матрицы экстраполяции должна соответствовать матрице перехода в модели движения объекта.

Важно, что объект может двигаться как по прямой, так и по более сложной траектории. В этом случае траекторию движения следует аппроксимировать, разбивая ее на элементы, описываемые простыми различными функциями, в частности, кривыми первого и второго порядков.

Такой подход вполне уместен, поскольку временные отчеты поступления РТИ происходят на интервалах, при которых траектория движения объектов вполне укладывается в рамки указанных ограничений. При этом с каждым последующим измерением траектория движения, а, следовательно, и координаты подвижного объекта будут итерационно уточняться, сводя к минимуму ошибку интерполяции. Указанный принцип демонстрируется на рисунке 5, где представлены пять итераций измерения параметров вектора состояния подвижного объекта, проводимых относительно двух РТС, размещенных на двух пунктах доступа. Фоновым цветом выделена область, определяемая ошибкой оценивания.

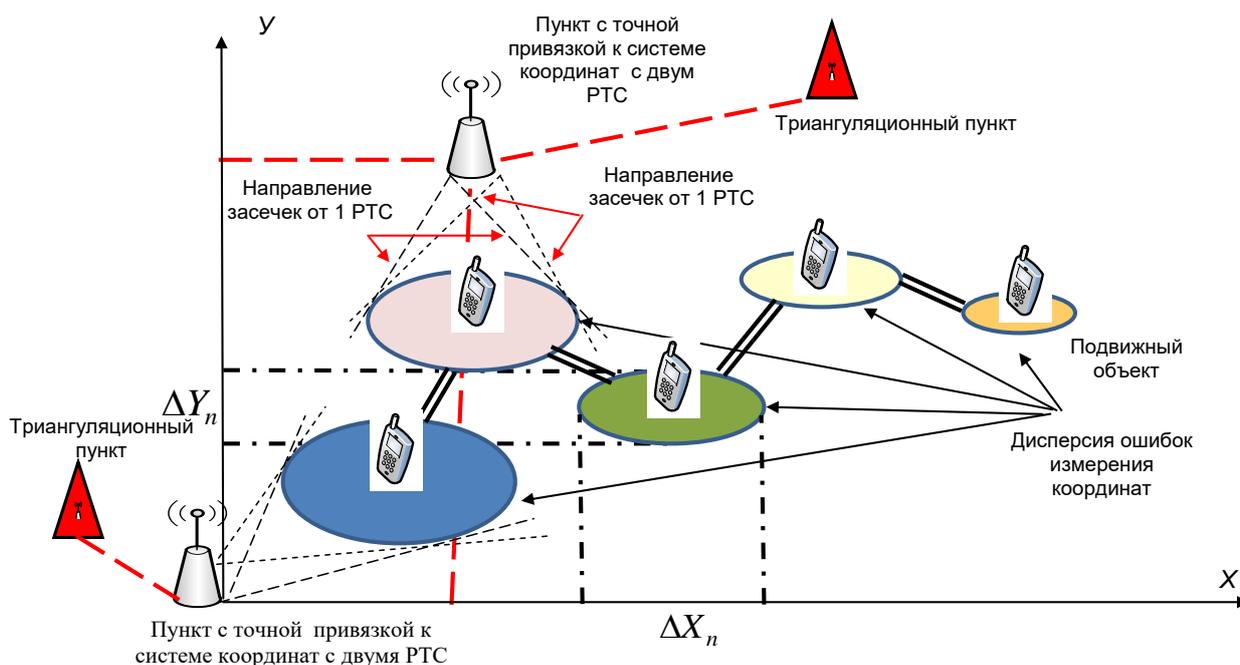


Рис. 5. Итерационное уточнение координат подвижного объекта в ходе оценивания его параметров вектора состояния

Реализация рассмотренного подхода предполагает последовательное выполнение следующих технологических операций.

1) Для пунктов доступа, содержащих РТС, осуществляют топогеодезическую привязку на местности, и относительно одного из пунктов формируют относительно систему декартовых координат x и y .

2) Аппаратуру РТС переводят в режим синхронизации. Он может быть постоянным или реализовываться на уровне временных вставок.

3) Приемные устройства подвижных объектов переводят в режим обработки РТИ. Это может быть постоянный режим, или же функционирование осуществляется на уровне временных вставок.

4) Определяют координаты местонахождения подвижных объектов по данным единичных измерений в результате приема и обработки РТИ не менее чем от двух пунктов доступа. Координаты вычисляют в относительных значениях или же их пересчитывают в долготу и широту.

5) Формируют динамическую модель вектора состояний подвижного объекта и определяют траекторию его движения в координатах относительно источников радиотехнической информации.

6) Обрабатывают полученную координатную информацию, итерационно уменьшая дисперсию ошибок измерения координат подвижного объекта.

Выполнение вышеуказанных технологических операций позволит уточнять координаты подвижных объектов при каждой итерации, что позволит минимизировать ошибки интерполяции.

Оценка эффективности динамической модели вектора состояний при позиционировании подвижных объектов по результатам моделирования

В целях проверки эффективности разработанных подходов проведено моделирование на основе разработанной программы в среде *MathLab*, которое включает реализацию следующих технологических процедур и процессов:

- моделирование движения объекта, содержащего две независимые РТС;
- оценивание параметров вектора состояний (координатной информации о подвижном объекте) по результатам многократных измерений и обработки сигналов двух независимых системы беспроводного доступа *Wi-Fi* и *WiMAX* (в интересах последующей реализации процедур ТОРТИ);
- алгоритмизация ТОРТИ (оценок параметров движения объекта);
- визуализация графиков ошибок оценивания параметров движения объекта.

Моделирование движения объекта по координатам x и y проводилось в течение 180 с, фрагмент траектории аппроксимировался кривыми 2-го порядка с параметрами (знак минус указывает направление):

$$x_0 = 10\,680 \text{ м}; \dot{x}_0 = -8,2 \text{ м/с}; \ddot{x}_0 = \ddot{x}(n) = -0,125 \text{ м/с}^2;$$

$$y_0 = 3700 \text{ м}; \dot{y}_0 = 23,6 \text{ м/с}; \ddot{y}_0 = \ddot{y}(n) = 1,82 \text{ м/с}^2.$$

Согласно алгоритму, значения координат x и y , измеренные двумя РТС (на основе сигналов *Wi-Fi* и *WiMAX*) поступали на независимые ВОРТИ с ин-

тервалами $T_1 = T_2 = 0,5$ секунды с дисперсиями ошибок измерения 100 м^2 и 9 м^2 соответственно. При этом делалось допущение, что если измерения формируются от каждого источника РТИ в разные моменты времени, то, зная модель движения объекта (2), путём экстраполяции можно всегда привязать результат измерения к одному моменту времени для дальнейшего их использования в интересах ТОРТИ.

Учитывая, что траектории движения подвижного объекта описываются по каждой из координат кривыми второго порядка, то векторы состояния по каждой РТС будут описываться следующим образом:

$$x_1(n) = (x_1(n), \quad \dot{x}_1(n), \quad \ddot{x}_1(n))^T$$

и

$$x_2(n) = (x_2(n), \quad \dot{x}_2(n), \quad \ddot{x}_2(n))^T.$$

Здесь нижний индекс указывает номер РТС, в которой проводились измерения. Матрицы экстраполяции, наблюдения и весовая матрица для обеих измерительных РТС имели следующий вид:

$$\Phi(n) = \begin{bmatrix} 1 & T_{1(2)} & T_{1(2)}^2/2 \\ 0 & 1 & T_{1(2)} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0]; \quad K(n) = \begin{bmatrix} k_{11}(n) \\ k_{21}(n) \\ k_{31}(n) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Матрицы экстраполяции $P_3(n)$ и матрицы оценивания $P(n)$ фильтра Калмана (5) и (7) имели размерность 3×3 . При этом начальная матрица ошибок оценивания $P(0)$ задавалась с диагональными дисперсиями равными 10^3 . Это нужно для того, чтобы начальные значения весовой матрицы стремились к единице.

Снизу элементы весовой матрицы ограничивались по уровню:

$$K_{\text{огр}} = [0,0926 \quad 0,008 \quad 0,0003].$$

Ниже приводятся данные работы фильтра оценивания, сглаживающего ошибки измерения, на примере координаты x_1 . В частности, на рисунке 6 приведены графики изменения элементов весовой матрицы фильтра Калмана в рассматриваемый интервал времени. На рисунке 7 приведены графики изменения матрицы исходных ошибок измерения $f(n)$ координаты $x_1(n)$ и ошибки оценивания $e_1(n) = x(n) - \hat{x}_1(n)$ на выходе фильтра.

Анализ полученных результатов показывает, что в установившемся режиме работы фильтра Калмана ошибка оценивания координат подвижного объекта не превышает величины 5 м. Аналогичное уменьшение ошибок оценивания в сравнении с ошибками измерения наблюдается и для второй РТС, а также и для координаты y .

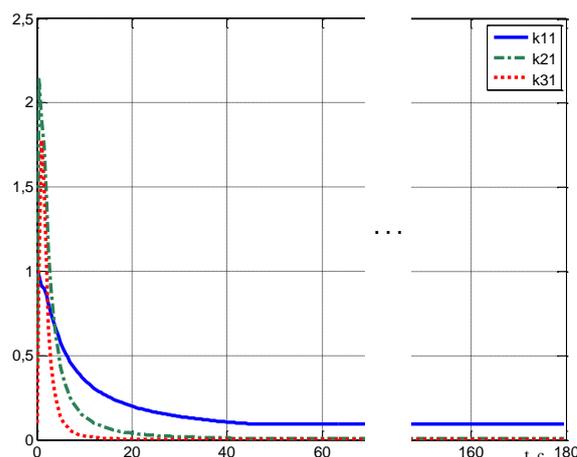


Рис. 6. Графики изменения элементов весовой матрицы фильтра Калмана $K(n)$

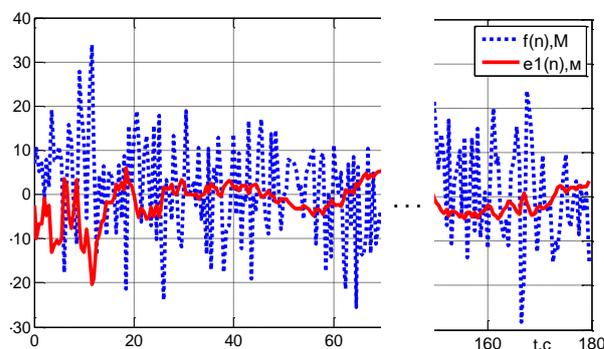


Рис. 7. Графики изменения ошибок измерения и ошибки оценивания

Итак, результаты моделирования подтверждают теоретические предположения о состоятельности разработанного подхода к повышению точности оценивания координат подвижных объектов за счет организации ВОРТИ. Предложенный в статье подход к организации ТОРТИ требует синтеза алгоритма совместной обработки координатной информации по данным двух независимых источников ВОРТИ, т. е. от двух РТС.

Заключение

Данные моделирования и результаты теоретического исследования по разработке частных моделей, в целом, подтверждают правомерность выбранного подхода к решению проблемы позиционирования подвижных объектов на основе методов пассивной локации.

При этом в качестве РТИ определены текущие значения координат, а также скорость и ускорение их изменения, получаемых по результатам обработки сигналов радиотехнических систем, в качестве которых выступают системы широкополосного доступа *Wi-Fi* и *WiMAX*.

Процедуры совместной обработки сигналов не менее чем от двух РТС, позволяющие получать РТИ, составляют существо ПОРТИ.

Важным условием реализации режима передачи РТИ является обеспечение синхронизации всех РТС, которая может достигаться специальными технологическими вставками в передаваемый трафик.

Задача позиционирования подвижных объектов решается относительно источников РТИ, в качестве которых выступают излучающие средства РТС на пунктах доступа (последние должны иметь топогеодезическую привязку на местности). Причем в пункте доступа может размещаться несколько источников РТИ, принадлежащих различным независимым РТС. При этом предполагается, что все источники единой РТС будут синхронизированы.

В основу научно-методического аппарата позиционирования подвижных объектов предлагается положить динамическую модель их вектора состояния, учитывающую процесс редукции сигнала наблюдения от источников РТИ.

В модели ПОРТИ предлагается использовать операции дискретизации, квантования и кодирования наблюдаемого процесса, поскольку это вписывается в рамки концепции обработки аналоговыми приемниками передаваемой цифровой РТИ.

Для разработанной динамической модели вектора состояния подвижных объектов сетей радиодоступа и модели наблюдения предлагается оценку параметров движения объекта осуществлять на принципах оптимальной фильтрации по Калману с ограничением элементов весовой матрицы фильтра снизу. Совокупность этих технологических процедур составит сущность ВОРТИ.

Результаты моделирования показывают, что применение предлагаемого НМА уже на 15-й секунде реализации процедур ВОРТИ позволяет уменьшить ошибку измерения координат почти в 20 раз со 100 м до 5 метров, что сопоставимо с точностью, обеспечиваемой радионавигационной системой ГЛОНАСС.

Авторы полагают, что разработанный НМА позволит успешно решать задачи логистики даже в условиях нарушения работы глобальных навигационных систем.

Дальнейшие исследования авторы связывают с реализацией и моделированием процедур ТОРТИ, а также повышение достоверности результатов за счет использования помехоустойчивых моделей сигналов [18–20] и продуктивных методов демодуляции [21].

Список используемых источников

1. Дворников С.В., Духовницкий О.Г. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного обслуживания системы ГЛОНАСС // *Информация и космос*. 2015. № 4. С. 73–77.
2. Снежко В.К., Якушенко С.А. Интегрированные системы навигации, связи и управления сухопутных подвижных объектов: учебное пособие для ВУЗов связи. СПб.: ВАС. 2008. 308 с.
3. Духовницкий О.Г. Методика оценки помехозащищенности каналов спутникового телевидения в условиях их подавления с беспилотных летательных аппаратов // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2015. Вып. 5. С. 3–8.
4. Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В. Исследование зависимости геометрического фактора топологии для разностно-дальномерного метода позиционирования // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2017. № 2. С. 86–93.
5. Духовницкий О.Г., Сиверс М.А., Фокин Г.А. Позиционирование абонентских станций в сетях мобильной связи LTE разностно-дальномерным методом // *Системы управления и информационные технологии*. 2015. Т. 59. № 1. С. 55–61.
6. Духовницкий О.Г. Целесообразность использования гибридного алгоритма позиционирования в совмещенной сети LTE/Wi-Fi // *Электросвязь*. 2015. № 6. С. 42–44.
7. Духовницкий О.Г. Предложения по разработке динамической модели вектора состояний подвижного объекта // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2015. Вып. 5. С. 9–15.
8. Дворников С.В. Проблема поиска сигналов источников информации при радиомониторинге // *Мобильные системы*. 2007. № 4. С. 33–35.
9. Первачев С.В., Валуев А.А., Чиликин В.М. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем. М.: Сов. радио. 1973. 488 с.
10. Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др. Вопросы статистической теории радиолокации / Под ред. Г.П. Тартаковского. М.: Сов. радио, 1964. Том II. 1078 с.
11. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь. 1993. 320 с.
12. Дворников С.В., Саяпин В.Н., Симонов А.Н. Теоретические основы координатометрии источников радиоизлучения: учебное пособие. СПб.: ВАС, 2007. 80 с.
13. Волков Р.В., Дворников С.В., Саяпин В.Н., Симонов А.Н. Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений: учебное пособие / Под редакцией Р. В. Волкова. СПб.: ВАС. 2013. 116 с.
14. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь. 1986. 352 с.
15. Дворников С.В., Яхеев А.Ф. Метод измерения параметров кратковременных сигналов на основе распределения Алексеева // *Информация и космос*. 2011. № 1. С. 66–74.

16. Дворников С.В., Кудрявцев А.М. Теоретические основы частотно-временного анализа кратковременных сигналов: монография. СПб.: ВАС, 2010. 240 с.
17. Саяпин В.Н., Дворников С.В., Симонов А.Н., Волков Р.В. Метод пространственно-временной фильтрации радиосигналов на основе антенных решеток произвольной пространственной конфигурации // Информация и космос. 2006. № 3. С. 83–89.
18. Дворников С.В., Пшеничников А.В., Бурыкин Д.А. Структурно-функциональная модель сигнального созвездия с повышенной помехоустойчивостью // Информация и космос. 2015. № 2. С. 4–7.
19. Дворников С.В., Дворников С.С., Спиринов А.М. Синтез манипулированных сигналов на основе вейвлет-функций // Информационные технологии. 2013. № 12. С. 52–55.
20. Дворников С.В., Манаенко С.С., Дворников С.С., Погорелов А.А. Синтез фазоманипулированных вейвлет-сигналов // Информационные технологии. 2015. № 2. С. 140–143.
21. Дворников С.В., Устинов А.А., Пшеничников А.В., Борисов В.В., Москалец А.Г., Бурыкин Д.А. Демодуляция сигналов ОФТ на основе адаптивного порога // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2013. № 2. С. 90–97.

* * *

DYNAMIC MODEL OF THE VECTOR OF MOBILE OBJECTS STATUS FOR THEIR POSITIONING IN WIRELESS ACCESS NETWORKS

S. Dvornikov¹, O. Dukhovnitsky², I. Fedorenko³

¹Telecommunications Military Academy,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

²Federal Communications Agency,
Moscow, 109289, Russian Federation

³Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, 195251, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Dvornikov S., Dukhovnitsky O., Fedorenko I. Dynamic Model of the Vector of Mobile Objects Status for Their Positioning in Wireless Access Networks // Proceedings of Telecommunication Universities. 2017. Vol. 3. Iss. 3. PP. 51–59.

Abstract: *The simulation data and the results of a theoretical study on the development of particular models providing the positioning of mobile objects in broadband access networks are presented. The main stages of the development of the dynamic model of the state vector of mobile objects based on passive location methods are given. The results of the development of the analytical apparatus and the carried out simulation are shown, which confirm the consistency of the approach that ensures the accuracy of positioning of mobile objects within 10 meters.*

Keywords: *positioning of moving objects; dynamic model of the state vector; processing of radio information; passive location methods.*