ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 629.197

ОДНОПОЗИЦИОННАЯ ПАССИВНАЯ ЛОКАЦИЯ И НАВИГАЦИЯ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ ПЕРИОДА РАДИОСИГНАЛА В ТОЧКЕ ПРИЕМА

© 2021 г. Ю. Г. Булычев[a], *, А. А. Мозоль[b, c]

[a]Всероссийский научно-исследовательский институт "Градиент", просп. Соколова, 96, Ростов-на-Дону, 344000 Российская Федерация

[b]Северо-Кавказский филиал Московского технического университета связи и информатики, ул. Серафимовича, 62, Ростов-на-Дону, 344000 Российская Федерация

[c]Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко, ул. Красина, 4, Краснодар, 350000 Российская Федерация

*E-mail: profbulychev@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.08.2020 г.
После доработки 10.11.2020 г.
Принята к публикации 25.11.2020 г.

Развит однопозиционный метод пассивной локации и навигации с учетом периодичности излучаемого радиосигнала (период может быть не известен), когда в паре источник излучения-наблюдатель один из объектов является стационарным, а второй движется по кусочно-линейной траектории с неизвестной скоростью. Измеряемым параметром является временная невязка между периодами излучаемого и принимаемого радиосигналов. Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой доплеровских поправок частоты на основе этой невязки, с наблюдаемостью метода для разных частных случаев, оценкой его точностных характеристик и практическими рекомендациями. Приведен численный пример.

DOI: 10.31857/S0033849421040021

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, связанные с однопозиционными методами пассивного определения местоположения и параметров движения различных типов объектов, остаются актуальными до настоящего времени. В большинстве случаев эти методы оперируют с пеленгами, разностями фаз, доплеровскими частотами, относительной мощностью радиосигналов и их различными производными, при этом зачастую используется дополнительная информация от различных источников подсвета, отражателей естественного и искусственного происхождения, внешних управляющих систем, а также априорные данные о структуре и некоторых параметрах излучаемого радиосигнала, скорости объекта, начальной или конечной точке его маршрута, наличии участков барражирования, возможности маневра и др. (см., например, [1–20]). При этом наибольший интерес представляют методы, для реализации которых не используются измерения пеленгов, поскольку достижение требуемой точности в пеленгаторных системах (особенно мобильных и связанных с осуществлением специального маневра), как правило, сопряжено с существенными техническими сложностями, большими габаритами и экономическими затратами.

Известны методы однопозиционной пассивной локации и навигации (ОПЛН), не использующие пеленги, но оперирующие с периодическими радиосигналами и ориентированные на возможность измерения непрерывного смещения доплеровской частоты принимаемого радиосигнала в точке наблюдения, обусловленного движением либо источника излучения (ИИ), либо наблюдателя (Н) в паре ИИ–Н (в работе [6] на с. 169–173 дан исчерпывающий список литературы по данному вопросу, доступной в открытой печати). При этом измерения могут осуществляться на любой характерной частоте из спектра излучаемого периодического радиосигнала (например, на центральной), либо модулирующей функции, а также путем сопоставления моментов прихода фронтов последовательных импульсов с учетом известного периода. По эволюции периода (в точке наблюдения) удается определять параметры движения одного из объектов пары ИИ–Н, не прибегая к пеленгационным измерениям. Все методы ОПЛН основаны на идее "синтеза базы", что приводит в конечном итоге к формированию нескольких точек наблюдения на траектории движения и возможности использования известных методов многопозиционной локации (например, триангуляционного, разностно-дальномерного, трилатерационного и их комбинаций [21, 22]).

В известных методах ОПЛН, как правило, рассматриваются такие траектории, которые на участке наблюдения либо известны (например, орбитальные с известными параметрами движения), либо с достаточной для практики точностью аппроксимируются моделью прямолинейного равномерного движения (как с известными, так и неизвестными параметрами движения). При этом принципиальным моментом для всех методов ОПЛН является учет априорной информации о величине скорости движущегося объекта (либо ИИ, либо Н) (см., например, [2, разд. 7] и [6, разд. 3]), что для практики зачастую является неприемлемым. Кроме того, в известных работах, посвященных методам ОПЛН, отсутствуют результаты какого-либо эксперимента, подтверждающие возможность эффективного применения этих методов с учетом периодичности излучаемого радиосигнала для некоторых характерных условий радиоконтакта.

Цель данной статьи состоит в разработке метода определения параметров движения объекта (Н) из пары ИИ–Н в условиях отсутствия априорной информации о величине скорости его движения. При этом в качестве пути достижения цели предполагается использовать (по аналогии с [6]) измерения эволюции периода радиосигнала, излучаемого стационарным ИИ.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ограничимся рассмотрением задачи навигации, поскольку развиваемый ниже метод без труда переносится на задачу локации. Пусть в прямоугольной декартовой системе координат XYZ, которую свяжем с ИИ, движение Н является кусочно-линейным, при этом на i-м участке используется следующая модель:

$$\vec{r}_i(t) = \vec{r}_i + \vec{v}_i(t - t_i), \quad i \in \overline{1, I},$$
$$t \in [t_i, t_{i+2}] = [t_i, t_{i+1}] \cup [t_{i+1}, t_{i+2}],$$
$$t_i \geq 0, \quad t_i < t_{i+1} < t_{i+2},$$

где $\vec{r}_i(t) = [x_i(t), y_i(t), z_i(t)]^T$, $\vec{r}_i = \vec{r}_i(t_i) = [x_i, y_i, z_i]^T$, $\vec{v}_i = [V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}]^T = \text{const}\ \forall t \in [t_i, t_{i+2}]$, $V_i = \|\vec{v}_i\|$ – модуль вектора скорости; $R_i(t) = \|\vec{r}_i(t)\|$ – дальность до Н в момент времени t; t_i, t_{i+1} и t_{i+2} – три основных узла (крупной временной сетки), с которыми связан "синтез базы" и определение параметров движения Н на i-м участке. Несколько забегая вперед, отметим, что при неизвестном периоде радиосигнала нам в дальнейшем потребуется и четвертый узел t_{i+3}, при этом $t_{i+3} > t_{i+2}$.

Стационарный ИИ вырабатывает периодический радиосигнал с периодом T_i (может быть неизвестен) и длительностью $m_{i+2}T_i$, где m_{i+2} – количество формируемых периодов.

В качестве типовых значений параметров радиосигналов, излучаемых, например, многофункциональными радиолокационными станциями, можно рассматривать следующие:

– частота следования импульсов 1...100 кГц;

– длительность импульсов 0.1...100 мкс;

– несущая частота 3...18 ГГц.

При этом наличие гармонической внутриимпульсной модуляции обеспечивает дополнительный информационный параметр. Режимы и параметры обзора пространства должны обеспечивать выполнение энергетического и информационного критериев по обнаружению и распознаванию сигнала.

Вследствие движения Н некоторая характерная мгновенная частота (о которой говорилось ранее) в точке наблюдения может быть представлена в виде $f_i(t) = f_{i0} - F_i(t)$, где $t \in [t_i, t_{i+2}]$, $F_i(t)$ – частота Доплера, которая зависит от выбора f_{i0}. Если $f_{i0} = T_i^{-1}$, то речь идет о частоте следования импульсов модулирующей функции; также под f_{i0} может пониматься частота несущего колебания.

Введем на интервале $[t_i, t_{i+2}]$ мелкую сетку $\{t_{ij}\}$, где $j = \overline{1, J_i}$, $t_{i1} = t_i$ и $t_{iJ_i} \leq t_{i+2}$, при этом $t_{i,j+1} = t_{i1} + \Delta_{i,j+1} = t_{i1} + m_{i,j+1}T_i + \delta_{i,j+1}$, $j \in \{1, 2, \ldots, J_i - 1\}$; $m_{i,j+1}$ – число подсчитываемых (в точке наблюдения) периодов излучаемого радиосигнала между узлами $t_i = t_{i1}$ и $t_{i,j+1}$; $\delta_{i,j+1} = c^{-1} \times (R_{i,j+1} - R_i) = c^{-1}\Delta R_{i,j+1}$ – информационная невязка (именно в ней содержится полезная информация о параметрах движения Н), обусловленная эволюцией $m_{i,j+1}$ периодов радиосигнала на интервале $[t_i, t_{i,j+1}]$. Здесь $R_i = R_i(t_i)$ и $R_{i,j+1} = R_i(t_{ij})$, c – скорость света. В непрерывном времени эволюцию невязки, обусловленную движением Н, можно описать некоторой функцией

$$\delta_i(t) = c^{-1}[R_i(t) - R_i] = c^{-1}\Delta R_i(t),$$
$$t \in [t_i, t_{i+2}], \quad \Delta R_i(t_i) = 0,$$

где $\delta_i(t_i) = \delta_i = 0$. Применительно к сетке $\{t_{ij}\}$ имеем $\delta_i(t_{ij}) = \delta_{ij}$.

Узлы t_k $(k \in \{i, i+1\})$ представим в виде $t_{k+1} = t_k + \Delta_{k+1}$, где $\Delta_{k+1} = t_{k+1} - t_i = m_{k+1}T_i + \delta_{k+1}$; m_{k+1} – максимально возможное целое число периодов радиосигнала, заполняющих интервал $[t_i, t_{k+1}]$; δ_{k+1} – невязка, обусловленная эволюцией m_{k+1} периодов радиосигнала в точке наблюдения на интервале $[t_i, t_{k+1}]$. В терминах функции $\delta_i(t)$ имеем $\delta_i(t_{i+1}) = \delta_{i+1}$ и $\delta_i(t_{i+2}) = \delta_{i+2}$.

Далее полагаем, что доступны измерения $h_{i(i+1,i+2)} = \delta_{i(i+1,i+2)} + \xi_{i(i+1,i+2)}$ и $h_{ij} = \delta_{ij} + \xi_{ij}$ величин δ_{i+1}, δ_{i+2} и δ_{ij} соответственно, при этом случайные погрешности измерений $\xi_{i(i+1,i+2)}$ и ξ_{ij} распределены по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и известными корреляционными матрицами $\mathbf{K}_{i2}$ и $\mathbf{K}_{i,J_i-1}$ (здесь индексы 2 и $J_i - 1$ указывают на размерности матриц). Размер J_i мелкой сетки $\{t_{ij}\}$ выбирается таким, чтобы в рамках развиваемого метода обеспечивались необходимые точность и устойчивость применяемых вычислительных процедур.

Для принятых моделей движения и измерения на интервале $[t_i, t_{i+2}]$ требуется оценить частоту Доплера $F_i\,(t)$, дальности $R_{i\,(i+1,\,i+2)}$ и курсовые углы $\theta_{i\,(i+1,\,i+2)}$ в узлах $t_{i\,(i+1,\,i+2)}$, а также скорость V_i наблюдателя для данного интервала.

Близкая (по сути) постановка задачи рассматривалась в [6, с. 153—158], однако теперь скорость Н полагается априорно неизвестной и модель движения принята кусочно-линейной, при этом рассматриваются два принципиально разных случая: период радиосигнала известен (случай 1) и неизвестен (случай 2).

2. РЯД УТВЕРЖДЕНИЙ. ОЦЕНИВАНИЕ ЧАСТОТЫ ДОПЛЕРА

Применительно к рассмотренной постановке задачи далее будем пользоваться следующими легко доказываемыми утверждениями.

Утверждение 1: справедливо строгое равенство $R_i^2\,(t) = a_{i0} + a_{i1}t + a_{i2}t^2$, где $\{a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}\}$ — некоторые действительные коэффициенты, соответствующие модели движения Н.

Утверждение 2: если только Н не движется на ИИ, то функция $\delta_i(t)$ является гладкой (дифференцируемой) и выпуклой (не содержит точек перегиба) на всем интервале $[t_i, t_{i+2}]$.

Утверждение 3: если Н движется на ИИ (в этом случае курсовой угол равен нулю), то $F_i\,(t) = F_i = \text{const}$ и $\dot{\delta}_i\,(t) = \text{const}$ на всем интервале $[t_i, t_{i+2}]$ (здесь и далее точка сверху означает дифференцирование по t), следовательно, $R_i\,(t)$ и $\delta_i(t)$ — линейные функции времени на этом интервале.

Утверждение 4: условие $F_i = 0$ возможно только при попадании Н в точку траверза.

Развиваемый метод предполагает знание доплеровских поправок частоты $F_i = F_i\,(t_i)$, $F_{i+1} = F_i\,(t_{i+1})$ и $F_{i+2} = F_i\,(t_{i+2})$ в узлах t_i, t_{i+1} и t_{i+2}, поэтому в данном разделе предлагаем эффективный алгоритм оценивания этих величин с использованием мелкой сетки $\{t_{ij}\}$ и наблюдений $\{h_{ij}\}$. Он основан на возможности представления частоты Доплера в виде $F_i\,(t) = c^{-1} f_{i0}\,\dot{R}_i\,(t) = f_{i0}\,\dot{\delta}_i\,(t)$. Поскольку функция $\delta_i(t)$ является гладкой (утверждение 2), то путем соответствующего выбора объема сетки $\{t_{ij}\}$ можно добиться достаточно высокой точности представления производной $\dot{\delta}_i\,(t)$ на базе инвариантно-несмещенного алгоритма оптимального оценивания производных при наличии не только флуктуационных, но и сингулярных погрешностей [23]. В простейшем случае достаточно ограничиться традиционным методом наименьших квадратов, если предположить, что по результатам измерений h_{ij} сформированы частные оценки $\hat{\delta}_{ij} = h_{ij} - m_{ij}T_i$ величин δ_{ij}. Используя сглаживающий полином $\alpha_i\,(t) = \mathbf{b}_i^T \mathbf{\Psi}_i\,(t)$ (с заданным вектором $\mathbf{\Psi}_i\,(t)$ базисных функций), путем минимизации соответствующей невязки, например

$$\nabla_i\,(\mathbf{b}_i) = \sum_{j=1}^{J_i-1} \left[\hat{\delta}_{ij} - \alpha_i\,(t_{ij})\right]^2$$

(для случая равноточных измерений), находим результирующую оценку $\mathbf{b}_i^*$ вектора коэффициентов $\mathbf{b}_i$:

$$\mathbf{b}_i^* = \arg\min_{\mathbf{b}_i} \nabla_i\,(\mathbf{b}_i).$$

Подобную оценку можно найти, используя общее правило:

$$\mathbf{b}_i^* = \Xi\left(\mathbf{h}_i, \mathbf{K}_{i,J_i-1}\right),$$

где $\Xi\,(\cdot,\cdot)$ — некоторый оператор оптимальной или субоптимальной обработки [24], учитывающий особенности проведения и обработки измерений $\mathbf{h}_i = \left[h_{ij}, j = \overline{1, J_i}\right]^T$. Теперь можно найти результирующую оценку $F_i^*(t)$ частоты Доплера $F_i(t)$ для любого $t \in [t_i, t_{i+2}]$, в том числе оценки F_i^*, F_{i+1}^* и F_{i+2}^* для узлов t_i, t_{i+1} и t_{i+2} соответственно:

$$F_k^* = f_{i0} \left[(\mathbf{b}^*)^T\, \mathbf{\Psi}\,(t)\right]_k^{(1)},$$

где под $[\bullet]_k^{(1)}$ понимается оператор дифференцирования в точке $t = t_k$, $k \in \{i, i+1, i+2\}$. Как показано далее в численном примере, эффекты накопления и сглаживания существенно повышают точность вычисления доплеровских поправок частоты согласно предложенному подходу.

Далее с учетом того, что F_i, F_{i+1} и F_{i+2} нам известны, рассмотрим вопрос определения параметров движения Н для двух случаев: период радиосигнала известен (случай 1) и неизвестен (случай 2).

3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ РАДИОСИГНАЛА С ИЗВЕСТНЫМ ПЕРИОДОМ

Для первой производной $\dot{R}_{i+1}$ дальности $R_i(t)$ в точке t_{i+1} справедливо

$$\dot{R}_{i+1} = R_{i+1}^{-1}\vec{r}_{i+1}^{\,T}\vec{v}_i = R_{i+1}^{-1}\left(\vec{r}_i^{\,T}\vec{v}_i + V_i^2\Delta_{i+1}\right). \quad (1)$$

Так как для движущегося Н мгновенная частота $f_i(t)$ входного радиосигнала является функцией времени (вследствие эффекта Доплера), то для точки t_{i+1} справедлива запись $f_i(t_{i+1}) = f_{i0} - F_{i+1}$, где $F_{i+1} = c^{-1}f_{i0}\,\dot{R}_{i+1}$ – доплеровская поправка частоты. Следовательно, с учетом (1) получаем

$$\vec{r}_i^{\,T}\vec{v}_i + V_i^2\Delta_{i+1} = cf_{i0}^{-1}F_{i+1}R_{i+1}. \quad (2)$$

По аналогии с (2), для момента времени t_i имеем

$$\vec{r}_i^{\,T}\vec{v}_i = cf_{i0}^{-1}F_iR_i, \quad (3)$$

где учтено, что $\Delta_i = t_i - t_i = 0$. На основании (2) и (3) получаем

$$V_i^2c^{-1}f_{i0} = (\Delta_{i+1})^{-1}(F_{i+1}R_{i+1} - F_iR_i). \quad (4)$$

Представим приращение дальности на интервале Δ_{i+1} в виде

$$R_{i+1} - R_i = c\delta_{i+1} = c(\Delta_{i+1} - m_{i+1}T_i), \quad (5)$$

при этом если Н удаляется, то $R_{i+1} > R_i$ и $\delta_{i+1} > 0$, если Н приближается, то $R_{i+1} < R_i$ и $\delta_{i+1} < 0$, а если Н неподвижен, то $R_{i+1} = R_i$ и $\delta_{i+1} = 0$. Смена знака для δ_{i+1} возможна только в точке траверза.

Выражая из (5) величину R_{i+1} и подставляя ее в (4), получаем

$$V_i^2c^{-1}f_{i0} = (\Delta_{i+1})^{-1}\left[\Delta_{i+1}^F R_i + cF_{i+1}(\Delta_{i+1} - m_{i+1}T_i)\right], \quad (6)$$

где $\Delta_{i+1}^F = F_{i+1} - F_i$ – приращение доплеровского смещения частоты радиосигнала за время Δ_{i+1}. По аналогии с (6) для моментов времени t_i и t_{i+2} имеем

$$V_i^2c^{-1}f_{i0} = (\Delta_{i+2})^{-1}\left[\Delta_{i+2}^F R_i + cF_{i+2}(\Delta_{i+2} - m_{i+2}T_i)\right]. \quad (7)$$

Приравнивая (6) и (7), формируем искомое выражение для определения дальности R_i в момент времени t_i:

$$R_i = c\,\frac{F_{i+2}\Delta_{i+1}(\Delta_{i+2} - m_{i+2}T_i) - F_{i+1}\Delta_{i+2}(\Delta_{i+1} - m_{i+1}T_i)}{\Delta_{i+1}^F\Delta_{i+2} - \Delta_{i+2}^F\Delta_{i+1}}. \quad (8)$$

С учетом (5), по аналогии с (8), можно найти R_{i+1} и R_{i+2} (используя единую запись $R_{i+1(i+2)}$) для моментов времени t_{i+1} и t_{i+2} соответственно:

$$R_{i+1(i+2)} = R_i + c\left(\Delta_{i+1(i+2)} - m_{i+1(i+2)}T_i\right). \quad (9)$$

Подставляя (8) в (6), после несложных преобразований находим формулу для определения скорости движения Н:

$$V_i = \left|c(f_{i0}\Delta_{i+1})^{-1}\left(R_i\Delta_{i+1}^F + cF_{i+1}(\Delta_{i+1} - m_{i+1}T_i)\right)\right|^{1/2}. \quad (10)$$

С учетом того, что $\dot{R}_k = \pm V_k\cos\theta_k = cf_{i0}^{-1}F_k$, для нахождения курсовых углов можно воспользоваться формулой

$$\theta_k = \arccos\left(cV_i^{-1}f_{i0}^{-1}F_k\right), \quad k \in \{i, i+1, i+2\}, \quad (11)$$

где скорость V_i находится в соответствии с (10).

Выражения (8)–(11) позволяют определять дальность, скорость и курсовой угол Н, по измерениям временных невязок, характеризующих эволюцию периодов излученного радиосигнала в точке наблюдения.

4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ РАДИОСИГНАЛА С НЕИЗВЕСТНЫМ ПЕРИОДОМ

Если период T_i неизвестен, то наряду с t_i, t_{i+1} и t_{i+2} потребуется четвертый радиоконтакт t_{i+3}. Принимая для простоты, что число накапливаемых периодов между соседними узлами одинаково (т.е. $m_{i+2} - m_{i+1} = m_{i+3} - m_{i+2}$), запишем следующие выражения (обозначив $\Delta'_{mn} = t_n - t_m$, $G_{mnp} = F_m\Delta'_{np}$, $S_{mnp} = \Delta'_{pn} - 2\Delta'_{nm}$, $Q_{mnp} = \Delta'_{np} - \Delta'_{nm}$, $m, n, p \in \{i, j, k, l\}$):

$$\begin{cases} R_i = c(L_{ijkl} + M_{ijkl})(H_{ijkl} + P_{ijkl})^{-1}, \\ R_j = \left[R_i(2G_{lji} - G_{ili} + G_{iji}) - cS_{ijl}G_{lji}\right](3G_{lji} - G_{jli})^{-1}, \quad j = i+1, \\ R_k = cQ_{ijk} + 2R_j - R_i, \quad k = i+2, \\ R_l = cS_{ijl} + 3R_j - 2R_i, \quad l = i+3, \end{cases} \quad (12)$$

$$V_i = \left| c\left(f_{i0}\Delta_{i+1}\right)^{-1}\left(F_j R_j - F_i R_i\right)\right|^{1/2}, \qquad (13)$$

$$\theta_{i(j,k)} = \arccos\left(cV_i^{-1} f_{i0}^{-1} F_{i(j,k)}\right), \qquad (14)$$

где

$$\begin{cases} L_{ijkl} = S_{ijl}G_{lji}\left(3G_{lki} - 2G_{kli}\right), \\ M_{ijkl} = \left(S_{ijl}G_{lki} - Q_{ijk}G_{kli}\right)\left(G_{jli} - 3G_{lji}\right), \\ H_{ijkl} = \left(3G_{lki} - 2G_{kli}\right)\left(2G_{lji} - G_{ili} + G_{iji}\right), \\ P_{ijkl} = \left(G_{jli} - 3G_{lji}\right)\left(2G_{lki} - G_{ili} + G_{iki} - G_{kli}\right). \end{cases} \qquad (15)$$

Таким образом, выражения (12)–(15) позволяют решать задачу определения параметров движения Н не только при неизвестной скорости, но и для случая, когда период радиосигнала априорно не задан.

5. АНАЛИЗ ЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ

Случай 1: движение Н по линии визирования. В этом случае дальность $R_i(t)$ есть линейная функция времени, а ее производная $\dot{R}_i(t) \equiv \text{const}$, $F_i(t) = F_i = F_{i+1} = F_{i+2}$ и $\Delta_{i+1}^F = 0$, $\Delta_{i+2}^F = 0$, следовательно, знаменатель в формуле (8) равен нулю и нахождение дальности по формулам (8), (9) и (12) становится невозможным (нарушается условие наблюдаемости метода). Так как

$$\dot{R}_i = cf_{i0}^{-1}F_i = \pm V_i = \text{const},$$

то для скорости Н справедливо

$$V_i = c\left|\dot{\delta}_i\right| = c\left|\dot{\delta}_{i+1}\right| = c\left|\dot{\delta}_{i+2}\right|,$$

а для курсового угла –

$$\theta_k = \arccos\left[\left(\dot{\delta}_k\right)^{-1} f_{i0}^{-1}F_k\right],$$

где $k \in \{i, i+1, i+2\}$.

Случай 2: узел t_{i+1} соответствует точке траверза, при этом выполнено условие $R_i = R_{i+2}$, $\Delta_{i+2} = 2\Delta_{i+1}$ и $F_{i+1} = 0$ (утверждение 4). Тогда в (8) знаменатель имеет вид

$$\Delta_{i+1}^F\Delta_{i+2} - \Delta_{i+2}^F\Delta_{i+1} = 2F_i\Delta_{i+1} - F_i\Delta_{i+2} = \\ = 2F_i\Delta_{i+1} - 2F_i\Delta_{i+1} = 0.$$

Следовательно, выражения (8)–(11) для случая 2 некорректны (нарушается условие наблюдаемости метода).

Для случаев, связанных с движением Н в направлении на ИИ, можно воспользоваться энергетическим методом [13–15], принимая в нем курсовой угол равным нулю. Доказано, что данный метод, оперирующий с относительными амплитудами и мощностями принимаемого радиосигнала для различных моментов времени, обеспечивает в направлении на ИИ наивысшую точность. Следовательно, комбинируя развиваемый и энергетический методы, можно выровнять рабочую зону комплексного метода и достичь приемлемых точностных характеристик для всех значений курсовых углов. Для более эффективного применения энергетических методов следует использовать процедуры кластеризации и мажоритарной обработки для редукции и отсева ненадежных измерений.

6. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Для оценки влияния случайных ошибок измерений ξ_{ij} на точностные характеристики развиваемого метода (в рамках формул (8)–(11), (12)–(15)) зададим вектор оцениваемых параметров в виде $\boldsymbol{\eta}_i = \left[\eta_{iq}, q = \overline{1,Q}\right]^T$, где размерность Q определяется в зависимости от решаемой практической задачи, а $\eta_{iq} \in \{R_i, R_{i+1}, R_{i+2}, V_i, \theta_i, \theta_{i+1}, \theta_{i+2}\}$. Для вектора $\boldsymbol{\eta}_i$ можно воспользоваться представлением $\boldsymbol{\eta}_i = \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{\delta}_i)$ ($\boldsymbol{\delta}_i = \left[\delta_{ij}, j = \overline{1, J_i - 1}\right]^T$ – единый вектор измеряемых параметров для участка $[t_i, t_{i+2}]$), которое формируется с учетом ранее полученных аналитических выражений для дальности, скорости и курсового угла. Поскольку вид функции $\boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{\delta}_i)$ нам известен, то можно построить матрицу частных производных $\mathbf{G}_i = \partial\boldsymbol{\varphi}_i(\boldsymbol{\delta}_i)/\partial\boldsymbol{\delta}_i$, элементы которой вычисляются на математических ожиданиях величин h_{ij}, т.е. на δ_{ij}. Далее, применяя традиционную методику оценивания потенциальных возможностей тех или иных методов оценивания (в первом приближении [25]), находим искомую корреляционную матрицу ошибок оценивания координат вектора $\boldsymbol{\eta}_i$:

$$\mathbf{K}_{\eta i} = \mathbf{G}_i\mathbf{K}_{i,J_i-1}\mathbf{G}_i^T. \qquad (16)$$

Соотношение (16) позволяет исследовать (в среднем) влияние случайных погрешностей измерений для различной геометрии и возможных условий радиоконтакта пары ИИ–Н, а также обоснованно подходить к выбору основных параметров развитого метода.

7. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Рассмотрим прямолинейно и равномерно движущегося Н (с постоянной скоростью V) на всем интервале наблюдения. В качестве такого наблюдателя могут быть воздушные объекты, движущиеся со скоростями 500...800 м/с (например, авиационные истребители), или космические объекты, скорости движения которых составляют 7...11 км/с (например, межконтинентальные баллистические ракеты на внеатмосферном участке полета).

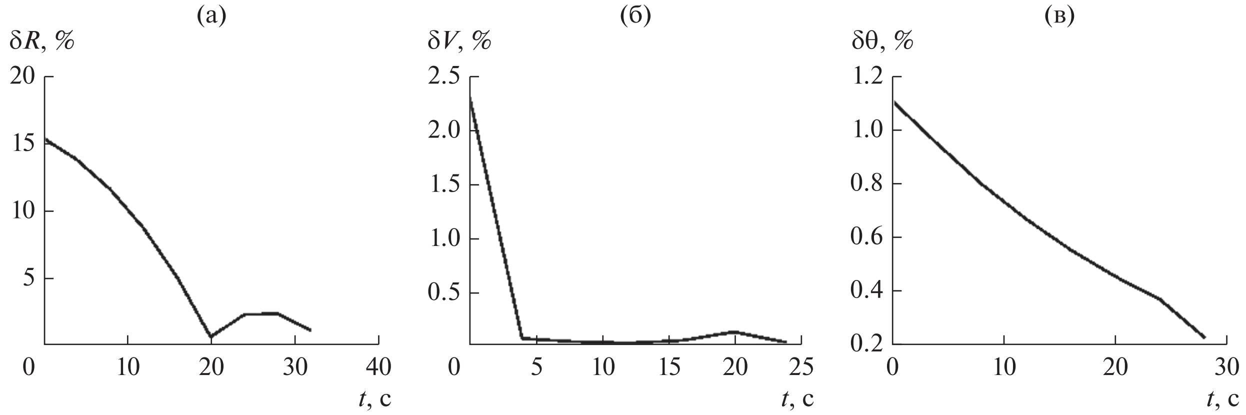

Рис. 1. Зависимости относительных погрешностей оценивания дальности (а), скорости (б) и курсового угла (в) от времени наблюдения для случая 1 при следующих параметрах: $\Delta m_{i,j+1} = 10^2$, $m_{i+2} = 2\ m_{i+1} = 8\times10^3$, $\sigma = 10^{-9}$.

Наземный ИИ излучает периодический радиосигнал

$$s(t) = \sum_{k=1}^{K} \mathrm{rect}\left[\left(t - k\times10^{-3}\right)/10^{-6}\right]\times$$
$$\times\cos\left(2\pi\times15\times10^{9}t\right),\ t\in[0...35].$$

Здесь и далее время и погрешности измерений временных интервалов задаются в секундах, координаты и дальность Н – в метрах, скорость – в метр на секунду, углы – в градусах и частота – в герцах. Рассматривались два случая:

случай 1 – $V = 7\times10^2$, $x_0 = 3\times10^4$, $y_0 = 15\times10^3$, $\theta(0) = 33.54$;

случай 2 – $V = 7\times10^3$, $x_0 = y_0 = 5\times10^5$, $\theta(0) = 51.52$.

Для вычисления частоты Доплера формировалась мелкая сетка $\{t_{ij}\}$ с одинаковым числом накапливаемых периодов для любых двух соседних узлов: $\Delta m_{i,j+1} = m_{i,j+1} - m_{i,j} = 10^2$ (в этом случае $J_i = 351$) и $\Delta m_{i,j+1} = m_{i,j+1} - m_{i,j} = 2\times10^2$ (в этом случае $J_i = 176$). Для сглаживания в процедуре формирования оценок F_i^*, F_{i+1}^* и F_{i+2}^* был использован степенной полином (шестой степени).

Для двух вариантов значений $m_{i+2} = 2m_{i+1} = 8\times10^3$ и $m_{i+2} = 2\ m_{i+1} = 14\times10^3$ формировалось множество непересекающихся последовательных временных троек $\{(t_i,t_{i+1},t_{i+2}),\ (t_{i+3},t_{i+4},t_{i+5}),\ldots,(t_{I-2},t_{I-1},t_I)\}$ (с целью формирования некоррелированных оценок), для каждой из которых по результатам измерений находились единичные оценки дальности, скорости и курсового угла. Для реализации сглаживающего эффекта все единичные оценки дальности возводились в квадрат (поскольку для модели прямолинейного равномерного движения Н именно квадрат дальности строго описывается полиномом второй степени) и сглаживались полиномом второй степени (утверждение 1). Окончательные значения оценок дальности находили путем извлечения квадратного корня из значений этого полинома в узлах крупной сетки $\{t_i,\ t_{i+1},\ldots,t_I\}$. Ошибки измерений полагались некоррелированными и формировались по нормальному закону распределения с тремя вариантами среднеквадратического отклонения $\sigma_{ij} = \sigma \in \{10^{-9}, 5\times10^{-9}, 10^{-8}\}$. Оценки усреднялись по тысяче реализаций.

Для случая 1 модуль частоты Доплера изменялся от 0.64×10^4 до 2.92×10^4, а для случая 2 – от 1.27×10^5 до 2.19×10^5. При этом для обоих случаев и варианта $\sigma = 5\times10^{-9}$ погрешность вычисления частоты Доплера в узлах крупной сетки не превысила 374.73. В случае 2 для обоих вариантов, $\Delta m_{i,j+1} = 10^2$ и $\Delta m_{i,j+1} = 2\times10^2$, получили $|\delta_{i,j+1} - \delta_{i,j}| \in [0.78...1.46]\times10^{-6}$ и $|\delta_{i,j+1} - \delta_{i,j}| \in [1.55...2.92]\times10^{-6}$ соответственно, а для $m_{i+2} = 2m_{i+1} = 8\times10^3$ и $m_{i+2} = 2m_{i+1} = 14\times10^3$ получили $|\delta_{i+1}|$, $|\delta_{i+2} - \delta_{i+1}| \in [3.59...5.73]\times10^{-5}$ и $|\delta_{i+1}|$, $|\delta_{i+2} - \delta_{i+1}| \in [6.02...9.86]\times10^{-5}$ соответственно.

На рис. 1–3 представлены зависимости относительных погрешностей оценивания дальности, скорости и курсового угла от времени наблюдения для случаев 1 и 2 при различных значениях исходных данных.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: чем больше шаг мелкой сетки, тем выше методическая ошибка вычисления

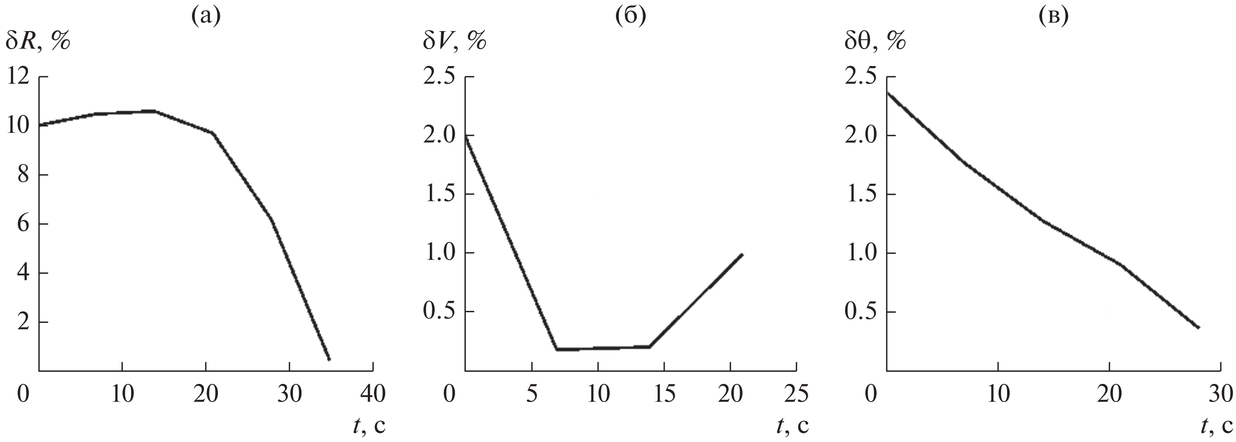

Рис. 2. Зависимости относительных погрешностей оценивания дальности (а), скорости (б) и курсового угла (в) от времени наблюдения для случая 1 при следующих параметрах: $\Delta m_{i,j+1} = 2\times10^2$, $m_{i+2} = 2\ m_{i+1} = 14\times10^3$, $\sigma = 5\times10^{-9}$.

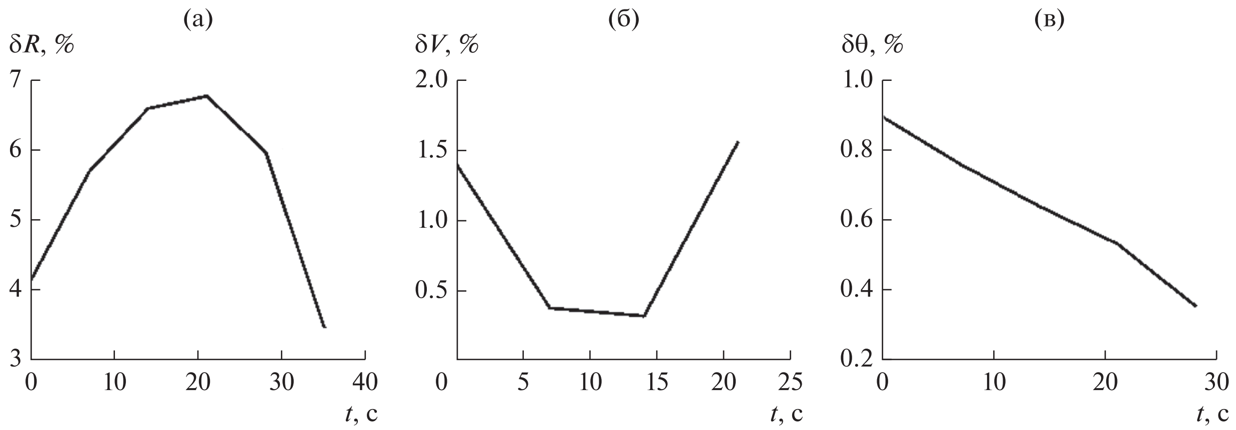

Рис. 3. Зависимости относительных погрешностей оценивания дальности (а), скорости (б) и курсового угла (в) от времени наблюдения для случая 2 при следующих параметрах: $\Delta m_{i,j+1} = 2\times10^2$, $m_{i+2} = 2\ m_{i+1} = 14\times10^3$, $\sigma = 10^{-8}$.

частоты Доплера, однако случайные погрешности измерений оказывают при этом меньшее влияние на результирующую точность оценивания этой частоты; для повышения точности оценивания параметров движения при фиксированной скорости Н следует увеличивать шаг крупной сетки, поскольку именно этот параметр влияет на величину “синтезируемой базы”; шаг крупной сетки должен быть согласован с возможной динамикой Н, а именно: чем меньше скорость движения Н, тем больше должен быть шаг этой сетки; выбор не пересекающихся измерительных троек крупной сетки, обеспечивает некоррелированность формируемых единичных оценок; для более эффективного использования метода следует решать оптимизационную задачу относительно выбора шага крупной и мелкой временных сеток, а также их согласования с учетом динамики Н и погрешностей измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от известных результатов разработанный метод характеризуется следующими элементами новизны: для решения задачи определения параметров движения на базе однопозиционной пассивной системы знание скорости Н не требуется; за счет оптимального оценивания производной от функции невязки между периодами излученного и принятого радиосигналов можно строить качественные оценки частот Доплера и, соответственно, параметров движения Н. При выборе параметров развитого метода необходимо достигать баланса между оперативностью и точностью оценивания дальности, скорости и курсового угла Н, с учетом технических возможностей применяемой однопозиционной системы пассивной локации или навигации.

Метод можно реализовать в различных вариантах: по фиксированной выборке измерений, по выборке измерений нарастающего объема, в виде алгоритма динамической фильтрации (линейной, квазилинейной или нелинейной) и др. [7–10, 18–20, 24].

Следует полагать, что эффективная практическая реализация предложенного метода возможна для различных значений параметров, если имеются соответствующие приемо-регистрирующие устройства для измерения (с требуемой точностью) величины относительного приращения периода принимаемого колебания. При этом все диапазоны указанных в постановке задачи типовых значений параметров радиосигналов в численном примере не проверялись.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы маневрирования кораблей / Под ред. М. Скворцова. М.: Воениздат, 1966.
2. *Шебшаевич В.С.* Введение в теорию космической навигации. М.: Сов. радио, 1971.
3. *Громов Г.Н.* Дифференциально-геометрический метод навигации. М.: Радио и связь, 1986.
4. *Хвощ В.А.* Тактика подводных лодок. М.: Воениздат, 1989.
5. *Соловьев Ю.А.* Спутниковая навигация и ее приложения. М.: Экотрендз, 2003.
6. *Мельников Ю.П., Попов С.В.* Радиотехническая разведка. М.: Радиотехника, 2008.
7. *Ярлыков М.С.* Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985.
8. *Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н.* Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника, 2014.
9. *Булычев Ю.Г., Манин А.П.* Математические аспекты определения движения летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 2000.
10. *Булычев Ю.Г., Васильев В.В., Джуган Р.В. и др.* Информационно-измерительное обеспечение натурных испытаний сложных технических комплексов. М.: Машиностроение–Полет, 2016.
11. *Гельцер А.А.* Однопозиционный метод определения местоположения источника радиоизлучения с использованием отражений сигналов от множества элементов рельефа и местных предметов // Автореф. дис. канд. техн. наук. Томск: Гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012. 22 с.
12. *Сиренко И.Л., Донец И.В., Рейзенкинд Я.А. и др.* // Радиотехника. 2019. № 10. С. 28.
13. *Булычев Ю.Г., Ивакина С.С., Насенков И.Г.* // Радиотехника. 2015. № 6. С. 107.
14. *Булычев Ю.Г., Мозоль А.А.* // Успехи совр. радиоэлектроники. 2017. № 4. С. 58.
15. *Булычев Ю.Г., Мозоль А.А., Насенков И.Г.* // РЭ. 2018. Т.63. № 6. С. 563.
16. *Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Ивакина С.С. и др.* // РЭ. 2016. Т. 61. № 4. С. 344.
17. *Дятлов А.П., Дятлов П.А.* // Спец. техника. 2010. № 5. С. 16.
18. *Aidala V.J., Nardone S.C.* // IEEE Trans. 1982. V. AES-18. № 4. P. 432.
19. *Amelin K.S., Miller A.B.* // J. Commun. Technol. Electron. 2014. V. 59. № 6. 2014. P. 622.
20. *Miller A.B.* // Automation and Remote Control. 2015. V. 76. № 6. P. 1018.
21. *Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н.* Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1986.
22. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993.
23. *Булычев Ю.Г., Елисеев А.В.* // Журн. вычислит. математики и матем. физики. 2008. Т. 48. № 4. С. 580.
24. *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. радио, 1978.
25. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М.: Высш. школа, 1999.