

УДК 621.396

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД КВАЗИОПТИМАЛЬНОЙ ОДНОПОЗИЦИОННОЙ ЛОКАЦИИ И НАВИГАЦИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Ю. Г. Булычев¹, А. А. Мозоль², А. Г. Кондрашов³, А. В. Ячменев⁴, А. С. Жук⁵

¹АО «ВНИИ «Градиент», 344000, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96

²СКФ МТУСИ, 344000, г. Ростов-на-Дону, ул. Серафимовича, 62

³АО «Научно-производственное объединение «Квант»,

173000, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 73

⁴Служба РЭБ ВМФ РФ, 190000, г. Санкт-Петербург, Адмиралтейский проспект, 1

⁵Кубанский государственный университет,
350090, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2018 г.

Аннотация. Для автономной стационарной измерительной системы, осуществляющей регистрацию нормированной мощности излучения (преимущественно прямого луча) движущегося источника (цели), развит альтернативный метод решения задачи дальнометрии с учетом имеющейся априорной информации. При этом модель изменения дальности принята в виде обобщенного полинома с неизвестными коэффициентами, а в качестве априорной информации используется одно выборочное значение дальности до цели (например, для начального или конечного момента времени из заданного интервала наблюдения). Обсуждаются вопросы квазиоптимальной параметрической идентификации данной модели, анализа точности формируемых оценок дальности, а также возможности использования данных оценок в многопозиционных системах пассивной локации и навигации. Дан иллюстративный пример, показывающий влияние случайных ошибок мощностных измерений и априорных данных на точностные характеристики метода.

Ключевые слова: движущийся источник излучения, обобщенная полиномиальная модель, нормированная модель, нормированные мощностные измерения, автономная стационарная измерительная система, априорная

информация, метод наименьших квадратов, квазиоптимальная оценка дальности, корреляционная матрица ошибок оценивания.

Abstract. For an autonomous stationary measuring system that records the normalized radiation power (mainly a direct beam) of a moving source (target), an alternative method has been developed to solve the ranging problem, taking into account the available a priori information. In this case, the model of changing the range is taken as a generalized polynomial with unknown coefficients, and one selective value of the distance to the target is used as a priori information (for example, for the initial or final moment of time from a given observation interval). The issues of quasi-optimal parametric identification of this model, the analysis of the accuracy of the generated range estimates, as well as the possibility of using these estimates in the multi-station systems of passive location and navigation are discussed. An illustrative example is given showing the effect of random errors in power measurements and a priori data on the accuracy characteristics of the method.

Key words: moving radiation source, generalized polynomial model, normalized model, normalized power measurements, autonomous stationary measuring system, a priori information, least squares method, quasi-optimal range estimate, correlation estimation error matrix.

1. Введение

В [1-17] рассмотрены альтернативные методы решения задачи дальнометрии на базе автономной стационарной измерительной системы (АСИС) локации или навигации. Они разработаны для воздушных излучающих целей (самолет, вертолет, беспилотный летательный аппарат и т.п.) с частично известными характеристиками движения, при этом в качестве измеряемых параметров используются нормированные мощности (амплитуды) входных сигналов (представляющих собой нормированные уровни излучения цели, регистрируемые на входе приемной антенны преимущественно за счет прямого луча, т.е. Received Signal Strength Indicator (RSSI)), углы места и азимута, либо псевдоизмерения (речь идет о косвенных измерениях [4-8]). Данные методы

ориентированы как на оптимальные, так и на квазиоптимальные подходы с учетом различных моделей и ограничений на условия наблюдения, а также имеющейся априорной информации (в качестве такой информации могут выступать данные о времени и точке старта, конечной точке маршрута, скорости и ускорении, курсовом угле и т.д.). В [1-17] показано, что приемлемое для практики качество оценивания дальности до излучающей цели при наличии априорной информации может быть зачастую получено именно на основе квазиоптимальных подходов, не прибегая к тонким и достаточно сложным процедурам линейной и нелинейной фильтрации.

Главным недостатком указанных методов, а также их различных модификаций является требование высокоточной пеленгации цели (порядка нескольких угловых минут и даже секунд), что сопряжено с необходимостью использования громоздких и дорогостоящих антенных систем, формирующих диаграммы направленности с узкими и стабильными лучами во всем рабочем диапазоне частот. Кроме того, данные методы ориентированы на цели, совершающие прямолинейное равномерное движение с известной величиной скорости.

В [18] разработан метод однопозиционной дальнометрии на базе стационарной приемной позиции при наличии одного энергетического измерительного канала, не прибегая к информации о пеленгах цели. При этом параметры радиолинии, характеризуемые некоторым обобщенным энергетическим коэффициентом из уравнения пассивной радиолокации, полагаются практически постоянными на всем интервале наблюдения (условие квазистационарности), а используемая антенна может быть ненаправленной или слабонаправленной, что позволяет устранить указанный главный недостаток известных методов [1-17]. Показано [18], что малогабаритные дальнометры, реализуемые на базе данного метода, могут применяться как автономно для решения различных целевых задач, так и в составе многопозиционного комплекса, способного оценивать все параметры движения излучающей цели. Набор дальностей в таком комплексе порождает семейство

линий или поверхностей положения (соответственно в виде окружностей или сфер), которые в совокупности позволяют решать задачу координатометрии. Однако предложенный в [18] алгоритм определения дальности имеет ограниченную область применения, так как он также ориентирован на цель, движущуюся равномерно и прямолинейно с известной скоростью.

В [10] показано, что указанное выше условие квазистационарности радиолинии выполняется (с той или иной степенью точности) при решении многих прикладных задач, например, в радиоэлектронной разведке [1]. Демонстрируется возможность привлечения нормированных мощностных измерений с учетом значений трех характерных параметров: T – времени наблюдения, λ – длины волны и h – высоты подъема приемной антенны. В [10] приводятся результирующие диаграммы направленности системы вертикальный вибратор-Земля, которые показывают, что при определенных ограничениях на данные параметры энергетический метод определения дальности и местоположения излучающей цели может оказаться достаточно эффективным. Здесь же иллюстрируется возможность применения этого метода для коротких длин волн ($\lambda \leq 10$ м) при малых значениях h и T . Т.е. даже с учетом результата интерференции полей прямой волны и волны, отраженной от плоской земной поверхности (рассчитывается при помощи коэффициентов отражения Френеля [19, 20]), для многих практически важных случаев результирующая диаграмма направленности является гладко-выпуклой и позволяет воспользоваться упомянутым ранее условием квазистационарности.

Таким образом, представляется актуальной разработка альтернативного энергетического метода, который устраняет отмеченные недостатки известных методов и позволяет решать задачу дальнометрии на базе энергетических измерений без привлечения пеленгов излучающей цели. Данный метод разрабатывается для таких воздушных целей и таких режимов работы АСИС, для которых выполняется упомянутое выше условие квазистационарности, т.е. когда на выбранном интервале наблюдения обобщенный энергетический коэффициент, входящий в соответствующее уравнение пассивной

радиолокации [19, 20], можно полагать постоянным. Данное ограничение несколько сужает область применения разрабатываемого метода, однако он может быть реализован с использованием минимального количества радиоконтактов (по аналогии с [12]). При наличии избыточного числа радиоконтактов можно учесть возможную нестационарность, характеризуемую небольшим числом степеней свободы, если воспользоваться экспоненциально-полиномиальной моделью радиолинии и квазиоптимальным алгоритмом дальнометрии, предложенным в работах [13, 15, 17]. По всей видимости, для случая существенной нестационарности (при большом числе степеней свободы), когда необходимо учитывать множество факторов неопределенности (например, эффект Доплера, многолучевость и т.п.), энергетический метод может не дать требуемого эффекта. Для этого потребуются проведение дополнительных исследований.

2. Постановка задачи

Имеется АСИС, регистрирующая уровень $p = p(t)$ мощности излучения (RSSI) движущейся цели на интервале наблюдения $[0, T]$. Для принятого интервала наблюдения и заданной на нем временной сетки $\{t_s\}_{s=0}^S$ сформируем вектор измеряемых параметров $\Xi = [p_s, s = \overline{0, S}]^T$ (здесь $p_s = p(t_s)$, $s = \overline{0, S}$, $t_0 = 0$, $t_S = T$), при этом используется аддитивная модель измерений $\hat{\Xi} = \Xi + \Delta\Xi$, где $\hat{\Xi} = [\hat{p}_s = p_s + \Delta p_s, s = \overline{0, S}]^T$, $\Delta\Xi = [\Delta p_s, s = \overline{0, S}]^T$ – вектор ошибок мощностных измерений, распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей $\mathbf{K}_{\Delta\Xi} = \mathbf{M}[\langle \Delta\Xi, \Delta\Xi \rangle]$ (где $\mathbf{M}[\cdot]$ – символ математического ожидания, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – символ скалярного произведения двух векторов).

Основу развиваемого метода составляет известное приближенное уравнение пассивной радиолинии [19, 20]:

$$p = \mu D^{-\gamma} = \mu [x^2 + y^2 + z^2]^{-\gamma/2}, \quad D = D(t) \neq 0, \quad (1)$$

где μ – обобщенный энергетический коэффициент (считаем его неизвестным и постоянным для выбранного интервала наблюдения – квазистационарный случай [11, 12]), характеризующий условия радиоконтакта; D – наклонная дальность до цели; x, y, z – декартовы координаты цели; $\gamma \in \mathbb{Q}$ ($\mathbb{Q} = \{\gamma | \gamma = a/b, a \in \mathbb{Z}^+, b \in \mathbb{Z}^+, b \neq 0\}$) – известный показатель степени, называемый также показателем потерь на трассе [19]. Экспериментально доказано [21-23], что $\gamma \in [2, 6]$, а в частных случаях $\gamma = 2$ (если излучение распространяется в свободном пространстве) и $\gamma = 4$ (если учитывается зеркальное отражение излучения от подстилающей поверхности и соответствующий интерференционный множитель [1, 19, 20]). Однако для различных частот и характера местности характерны эффекты, приводящие к существенному отклонению фактического значения показателя степени γ от приведенных значений.

Рассматриваемый нами квазистационарный случай является достаточно распространенным на практике при небольших интервалах наблюдения, особенно для слабонаправленных и ненаправленных антенн, а также при выполнении некоторых ограничений на длину волны λ и высоту h подъема приемной антенны [10, 11]. Однако полученные результаты несложно обобщить и на нестационарный случай, для чего достаточно воспользоваться подходом, разработанным в [13, 15, 17]. Не теряя общности, ограничимся рассмотрением уравнения пассивной квазистационарной радиолинии.

Воспользуемся обобщенной полиномиальной моделью, широко используемой на практике,

$$D^\gamma = D^\gamma(t) = \langle \mathbf{A}, \mathbf{\Psi} \rangle, \quad t \in [0, T], \quad (2)$$

где $\mathbf{A} = [a_m, m = \overline{0, M}]^T$ – вектор неизвестных коэффициентов, для которых

$D^\gamma \geq 0 \quad \forall t \in [0, T]$; $\mathbf{\Psi} = [\psi_m, m = \overline{0, M}]^T$ – вектор заданных базисных функций

$\psi_m = \psi_m(t), m = \overline{0, M}$.

Аппроксимация не самой дальности D , а ее степени D^γ выбрана из условия упрощения последующих выкладок и вычислений. Поскольку $D \geq 0 \forall t \in [0, T]$, то вернуться от D^γ к D не представляет никаких затруднений.

У с л о в и е: полагаем, что нам априорно известно одно значение дальности $\hat{D}_* = \hat{D}(t_*) = D_* + \Delta D_*$, где $t_* \in [0, T]$, при этом t_* не обязательно должно принадлежать сетке $\{t_s\}_{s=0}^S$. Ошибку ΔD_* задания величины D_* будем считать случайной, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma_{\Delta D_*}^2$, при этом величины ΔD_* и Δp_s полагаются независимыми.

Требуется с учетом принятых моделей и ограничений разработать метод однопозиционного определения дальности до излучающей цели по энергетическим измерениям, оценить его эффективность и границы применимости, привести рекомендации по его практическому использованию.

3. Основные соотношения метода

Используя уравнение (1), вместо (2) воспользуемся нормированной моделью

$$D^\gamma D_0^{-\gamma} = \langle \mathbf{C}, \Psi \rangle = p_0 p^{-1}, \quad D_0 \neq 0, \quad (3)$$

где $\mathbf{C} = [c_m, m = \overline{0, M}]^T$ – вектор неизвестных нормированных коэффициентов $c_m = a_m / D_0^\gamma$, p / p_0 – нормированная мощность.

Из (3) следует, что отношение $D^\gamma D_0^{-\gamma}$ не зависит от коэффициента $\mu \forall t \in [0, T]$, т.е. достигается свойство инвариантности, о котором упоминается в [10].

Вводя обозначение $Q_s = Q(t_s) = p_0 p_s^{-1}$, составим систему линейных алгебраических уравнений относительно нормированных коэффициентов

$$\langle \mathbf{C}, \Psi_s \rangle = Q_s, \quad s = \overline{0, S}, \quad (4)$$

где $\Psi_s = \Psi(t_s)$.

В матричной форме система (4) выглядит так

$$\Psi_S \mathbf{C} = \mathbf{Q}_S, \quad (5)$$

где $\Psi_S = [\psi_{ms}, s = \overline{0, S}, m = \overline{0, M}]$ и $\mathbf{Q}_S = [Q_s, s = \overline{0, S}]^T$ – матрица отсчетов базисных функций и вектор нормированных мощностных измерений, соответствующие временной сетке $\{t_s\}_0^S$.

Далее можно воспользоваться моделью косвенных измерений

$$\hat{\mathbf{Q}}_S = \mathbf{Q}_S + \Delta \mathbf{Q}_S = \Psi_S \hat{\mathbf{Q}}_S + \Delta \mathbf{Q}_S, \quad (6)$$

где $\Delta \mathbf{Q}_S$ – вектор ошибок измерений, характеризующийся нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей $\mathbf{K}_{\Delta \mathbf{Q}_S}$. С учетом известной функциональной зависимости между векторами Ξ и \mathbf{Q}_S элементы данной матрицы рассчитываются стандартным способом (с использованием известного принципа линеаризации [24]):

$$\mathbf{K}_{\Delta \mathbf{Q}_S} = \mathbf{F}_S \mathbf{K}_{\Delta \Xi} \mathbf{F}_S^T, \quad (7)$$

где $\mathbf{F}_S = [\partial Q_s / \partial p_l, s = \overline{0, S}, l = \overline{0, S}]$ – матрица частных производных, которая с учетом (4) имеет вид

$$\mathbf{F}_S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \dots \dots \dots 0 \\ p_1^{-1} & -p_0 p_1^{-2} & 0 & 0 \dots \dots \dots 0 \\ p_2^{-1} & 0 & -p_0 p_2^{-2} & 0 \dots \dots \dots 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ p_S^{-1} & 0 & 0 & 0 \dots \dots \dots -p_0 p_S^{-2} \end{bmatrix}.$$

С учетом (5) и (7) имеем следующую квазиоптимальную оценку $\hat{\mathbf{C}} = \mathbf{C} + \Delta \mathbf{C}$ вектора \mathbf{C} по методу наименьших квадратов

$$\hat{\mathbf{C}} = [\Psi_S^T \mathbf{W}_S \Psi_S]^{-1} [\Psi_S^T \mathbf{W}_S \hat{\mathbf{Q}}_S], \quad (8)$$

а также ее корреляционную матрицу

$$\mathbf{K}_{\Delta C} = \mathbf{G}_S \mathbf{K}_{\Delta Q_S} \mathbf{G}_S^T = \mathbf{G}_S (\mathbf{F}_S \mathbf{K}_{\Delta \Xi} \mathbf{F}_S^T) \mathbf{G}_S^T. \quad (9)$$

В выражениях (8) и (9) принято $\mathbf{W}_S = \mathbf{K}_{\Delta Q_S}^{-1}$ – весовая матрица,

$$\mathbf{G}_S = (\Psi_S^T \mathbf{W}_S \Psi_S)^{-1} \Psi_S^T \mathbf{W}_S. \quad (10)$$

Как показывают результаты исследований (в том числе приведенный численный эксперимент) построение оценки (8) целесообразно осуществлять на сглаженных измерениях. Практика показывает, что применение сглаженных косвенных измерений (например, псевдоизмерений в задачах оценивания и фильтрации [4-9]) позволяет получить линейный вариант решения этих задач в существенно нелинейных условиях наблюдения, и, как следствие, значительно упростить алгоритм вычислений при незначительном снижении качества результирующих оценок.

Нахождением вектора нормированных коэффициентов заканчивается первый этап развиваемого метода. Далее формируется выражение для нахождения искомой дальности.

С учетом (3) запишем

$$D = D_0 (\langle \mathbf{C}, \Psi \rangle)^{1/\gamma} = D_0 (p_0 p^{-1})^{1/\gamma}. \quad (11)$$

Так как для момента времени t_* нам известна оценка \hat{D}_* дальности D_* , то аналогичную оценку \hat{D}_0 величины D_0 в формуле (11) можно найти так

$$\hat{D}_0 = \hat{D}_* \langle \hat{\mathbf{C}}, \Psi_* \rangle^{-1/\gamma}, \quad (12)$$

где $\Psi_* = \Psi(t_*) = [\psi_m(t_*), m = \overline{0, M}]^T$.

Теперь с учетом (8), (11) и (12) получаем текущую оценку \hat{D}_s наклонной дальности D_s до излучающей цели в момент времени t_s :

$$\hat{D}_s = \hat{D}_* \langle \hat{\mathbf{C}}, \Psi_* \rangle^{-1/\gamma} \langle \hat{\mathbf{C}}, \Psi_s \rangle^{1/\gamma}, \quad s = \overline{0, S}, \quad (13)$$

где $\hat{D}_* \langle \hat{\mathbf{C}}, \Psi_* \rangle^{-1/\gamma} = \hat{D}_0$ – оценка дальности до цели в момент времени $t = 0$;
 $\hat{\mathbf{C}} = [\hat{c}_m, m = \overline{0, M}]^T$ – оценка метода наименьших квадратов для вектора
нормированных коэффициентов $\mathbf{C} = [c_m, m = \overline{0, M}]^T$.

Из (8)-(13) следует, что для наблюдаемости задачи энергетической дальнометрии в рамках развиваемого метода необходимо и достаточно выполнение условий: $D(t) \neq 0 \quad \forall t \in [0, T]$ и $\det \{ \Psi_S^T \mathbf{W}_S \Psi_S \} \neq 0$. Выражения (3)-(13) составляют математическую основу метода квазиоптимальной энергетической однопозиционной дальнометрии с учетом априорной информации о дальности до излучающей цели в некоторый фиксированный момент времени. В следующем разделе приводится методика анализа точностных характеристик развитого метода с учетом случайного характера параметров, входящих в формулу (13). Для этого используется широко применяемый в теории и практике способ линеаризации нелинейных функций, зависящих от случайных аргументов [24].

4. К анализу точностных характеристик энергетической дальнометрии

Рассматривая \hat{D}_s в выражении (13) как некоторую функцию $\hat{D}_s = g(\hat{D}_*, \hat{c}_0, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_M)$ случайных аргументов $\hat{D}_*, \hat{c}_0, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_M$, с учетом (9) можно найти дисперсию ошибки оценивания текущей дальности:

$$\sigma_{\Delta D_s}^2 = \left(\partial \hat{D}_s / \partial \hat{D}_* \right)^2 \sigma_{\Delta D_*}^2 + \sum_{m=0}^M \left(\partial \hat{D}_s / \partial \hat{c}_m \right)^2 \sigma_{\Delta c_m}^2 + \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^M \left(\partial \hat{D}_s / \partial \hat{c}_i \right) \left(\partial \hat{D}_s / \partial \hat{c}_j \right) r_{ij} \sigma_{\Delta c_i} \sigma_{\Delta c_j}, \quad (14)$$

где r_{ij} – коэффициент корреляции случайных ошибок Δc_i и Δc_j оценивания коэффициентов Δc_i и Δc_j соответственно.

Следует помнить, что все частные производные в выражении (14) вычисляются с использованием формулы (13), при этом в результаты

дифференцирования подставляются математические ожидания соответствующих случайных аргументов [24].

На базе выражений (13) и (14) можно всесторонне исследовать влияние всех случайных факторов на точность оценивания текущей дальности и выработать правильные рекомендации по применению развитого метода для решения различных целевых задач в тех или иных условиях наблюдения излучающей цели. Не сложно убедиться, что наивысшая точность оценивания соответствует окрестности точки t_* , для которой известно значение дальности D_* .

5. Применение метода для многопозиционной локации и навигации

Разработанный метод оценивания дальности может быть использован в многопозиционных системах автономной локации и навигации для построения результирующей оценки местоположения цели и других параметров ее движения в рамках известного дальномерно-дальномерного метода [25], оперирующего с линиями и поверхностями положения в виде окружностей (для плоскости) и сфер (для пространства). Согласно данному методу при выполнении определенных условий несколько окружностей или сфер дают точку пересечения, которая и соответствует искомому местоположению излучающей цели. Для случая, когда система состоит из трех позиций, имеем классическую задачу трилатерации [25], следовательно, используя формулу (13) для данного варианта наблюдения излучающей цели, можно найти ее декартовы координаты.

Сказанное относится лишь к случаю, когда не учитываются ошибки оценивания дальностей по формуле (13). В противном случае, при учете указанных ошибок, нахождение оценки местоположения цели в единой декартовой системе координат может основываться на следующем правиле, основанном на минимизации взвешенных невязок (применительно к задаче многопозиционной локации):

$$\begin{pmatrix} * & * & * \\ x_s, y_s, z_s \end{pmatrix} = \arg \min_{x_s, y_s, z_s} \delta J_s,$$

$$\text{где } \delta J_s = \sum_{n=1}^N \delta J_{sn} = \sum_{n=1}^N w_{sn} \left\{ D_{sn}^* - \left[(x_s - \rho_n^x)^2 + (y_s - \rho_n^y)^2 + (z_s - \rho_n^z)^2 \right]^{1/2} \right\}^2.$$

В данных выражениях принято: x_s^*, y_s^*, z_s^* – оценки декартовых координат цели для момента времени t_s ; $(\rho_n^x, \rho_n^y, \rho_n^z)$ – вектор декартовых координат n -й приемной позиции; N – число позиций; w_{sn} – неотрицательные веса, которые находятся с учетом (6)-(14); $D_{sn}^* = D_n^*(t_s)$ – оценка дальности до цели относительно n -й позиции, полученная с учетом формулы (13).

6. Практические рекомендации

В реальных условиях функционирования АСИС принятое ранее предположение о стационарности радиолинии ($\mu = \text{const } \forall t \in [0, T]$) выполняется далеко не всегда. Это обусловлено, в первую очередь, поливариантностью относительного положения лучей диаграмм направленности антенн пары «цель-АСИС». В этом случае целесообразно реализовывать разработанный энергетический метод в составе комплексного подхода, базирующегося на кластерно-селективном принципе обработки измерений с использованием рациональных ограничений задачи. В качестве таких ограничений можно принять допуск на максимально возможное относительное приращение мощности входного сигнала за время между двумя радиоконтактами с учетом имеющейся априорной информации о скорости движения цели. Такое приращение будет иметь место, когда источник излучения движется в направлении на АСИС. Для указанного приращения справедлива формула $\delta p_{ik} = 10^2 \left[1 - 10^4 \left(10^2 \pm \delta D_{ik} \right)^{-2} \right]$, где относительные величины δp_{ik} и δD_{ik} выражаются в процентах, $\delta D_{ik} = 100(\Delta D_{ik}/D_i)$ и $\delta p_{ik} = 100(\Delta p_{ik}/p_i)$, $\Delta D_{ik} = |D_i - D_k|$, $\Delta p_{ik} = |p_i - p_k|$, $i, k \in \overline{0, S}$.

Ввиду поливариантности возможного относительного положения лучей диаграмм направленности антенн пары «цель-АСИС» наряду с рациональными ограничениями необходимо реализовывать гипотезный подход, который заключается в сортировке энергетических измерений по различным кластерам \mathbb{K}_k , $k = \overline{1, K}$ с учетом принятых гипотез о возможных условиях радиоконтакта пары «цель-АСИС». Например, могут быть использованы следующие гипотезы (H), отвечающие различным вариантам относительного положения лучей диаграмм направленности (главного, боковых, задних): H_1 – главный-главный, H_2 – главный-боковой, H_3 – боковой-главный, H_4 – боковой-боковой и т.д.

Для решения задачи сортировки энергетических измерений с учетом семейства сформированных гипотез можно воспользоваться иерархическим агломеративным алгоритмом кластерного анализа с евклидовой нормой [26-28]. Из множества формируемых кластеров $\{\mathbb{K}_1, \mathbb{K}_2, \dots, \mathbb{K}_K\}$ необходимо выделить так называемое приоритетное семейство $\{\mathbb{K}_1^*, \mathbb{K}_2^*, \dots, \mathbb{K}_{K^*}^*\}$ (где $K^* \leq K$), каждый кластер которого содержит число элементов, превышающее некоторый пороговый уровень. Далее для всех кластеров \mathbb{K}_l^* (где $l \in \{1, 2, \dots, K^*\}$) применяется развитый энергетический метод, что позволяет строить соответствующие промежуточные оценки дальности $D_{[l]}^*(t)$, $l \in \{1, 2, \dots, K^*\}$, $t \in [0, T]$. Затем совместной обработкой оценок $D_{[1]}^*(t), D_{[2]}^*(t) \dots D_{[K^*]}^*(t)$ получаем результирующую оценку дальности до излучающей цели в виде $D^*(t) = \mathfrak{R}\{D_{[1]}^*(t), D_{[2]}^*(t) \dots D_{[K^*]}^*(t)\}$, где $\mathfrak{R}\{\cdot\}$ – оператор обработки кластерных оценок. Ясно, что такой оператор отдает предпочтение наиболее близким (в смысле евклидовой метрики) кластерным оценкам из приоритетного семейства, при этом аномальные оценки могут отбрасываться.

Разработанный энергетический метод наиболее хорошо подходит для тех случаев, когда на интервале наблюдения многократно и периодически повторяются одинаковые условия радиоконтакта, например, в АСИС кругового

обзора. При формировании гипотез следует учитывать возможное поляризационное ослабление [29, 30], а наряду с кластерным подходом для более эффективной реализации предложенного метода (с учетом больших объемов измерительных данных) можно также применять нейросетевой подход [31]. Кроме того, разработанный метод целесообразно реализовывать на измерениях, которым соответствует квазистационарный характер обобщенного энергетического коэффициента μ (т.е. уровень RSSI изменяется не скачкообразно).

7. Численный эксперимент

Предположим, что некоторая излучающая цель совершает равномерное движение в плоскости (выбранный плоский случай не умаляет возможностей разработанного метода, а лишь способствует простоте моделирования). В качестве цели примем самолет, а в качестве источника излучения – импульсно-доплеровскую РЛС, входящую в состав бортового радиолокационного оборудования. Рабочий частотный диапазон составляет от 9.7 ГГц до 9.9 ГГц, средняя мощность излучаемого сигнала – 4 кВт [32]. В дальнейшем все координаты и дальности задаются в метрах, время – в секундах, мощности – в ваттах. На интервале наблюдения $t \in [0, 59]$ рассматривается случай движения цели к АСИС (случай 1) и описывается уравнениями: $x(t) = 10^5 - 250t - 21t^2$, $y(t) = 8 \cdot 10^4 - 10^2 t - 3t^2$.

На указанном интервале наблюдения сформируем равномерную временную сетку $\{t_s\}_{s=0}^{59}$ с шагом $\Delta t = 1$. Кроме того, полагаем: $M = 2$, $\psi_0 = 1$, $\psi_1(t) = t - (S + 1)^{-1} \sum_{s=0}^S t_s$, $\psi_2(t) = t^2 - \psi_1(t) \left(\frac{\sum_{s=0}^S t_s^2 \psi_1(t_s)}{\sum_{s=0}^S \psi_1^2(t_s)} \right) - (S + 1)^{-1} \sum_{s=0}^S t_s^2$, т.е. в формуле (3) использована аппроксимация ортогональными (на сетке) полиномами Чебышева [33]. Условия радиоконтакта «цель-АСИС» примем такими: $t_* = 57$, $D_* = D(57) = 6.7 \cdot 10^4$, $\gamma = 2$, $p_0 = 10^{-5}$, а ошибки измерений являются независимыми и характеризуются корреляционной матрицей

$\mathbf{K}_{\Delta \Xi} = \text{diag}[\sigma^2, \sigma^2, \dots, \sigma^2]$, где $\sigma \in \left\{ 10^{-2} k (S + 1)^{-1} \sum_{s=0}^S p_s, k = \overline{1, 30} \right\}$. Истинные

значения текущей мощности формировались по формуле $p_s = p_0 D_0^\gamma / D_s^\gamma$. Для имитации погрешностей мощностных измерений использовался датчик псевдослучайных чисел.

Имитационное моделирование состояло в следующем (осуществлялось по 50 реализациям):

– для каждого фиксированного значения $\sigma \in \left\{ 10^{-2} k (S + 1)^{-1} \sum_{s=0}^S p_s, k = \overline{1, 30} \right\}$

имитировались измерения текущей мощности \hat{p}_s с использованием формулы

$$\hat{p}_s = p_s + \Delta p_s;$$

– формировались сглаженные наблюдения $\hat{Q}(t_s) = \hat{Q}_s = \hat{p}_0 / \hat{p}_s$;

– на базе сглаженных наблюдений для каждого значения σ находились оценки вектора $\hat{\mathbf{C}} = [\hat{c}_m, m = \overline{0, M}]^T$ и значения наклонной дальности по формулам (8) и (13) соответственно;

– для анализа влияния выбранной геометрии задачи рассмотрен случай движения цели в направлении от измерителя (случай 2): $x(t) = 1.2 \cdot 10^4 + 250t + 21t^2$, $y(t) = 6.4 \cdot 10^4 + 10^2 t + 3t^2$, $D_* = D(57) = 1.2 \cdot 10^5$.

Случаи 1 и 2 были выбраны таким образом, чтобы траектории движения цели примерно совпадали.

На рис. 1 показаны относительные погрешности наблюдения.

На рис. 2 показаны относительные погрешности определения текущей дальности. На обоих рисунках кривые соответствуют значениям

$$\sigma \in \left\{ 10^{-2} k (S + 1)^{-1} \sum_{s=0}^S p_s, k = 1, 3, \dots, 15 \right\}.$$

На рис. 3 показана эволюция текущей дальности, при этом сплошная линия соответствует истинной дальности, штриховая – оценкам текущей

дальности для значений $\sigma \in \left\{ 10^{-2} k (S + 1)^{-1} \sum_{s=0}^S p_s, k = 5, 10, 15 \right\}$.

На рис. 4 показана зависимость относительной погрешности дальности от значений σ (ломаная линия обозначает относительную погрешность единичных оценок, штриховая линия – результат сглаживания единичных оценок).

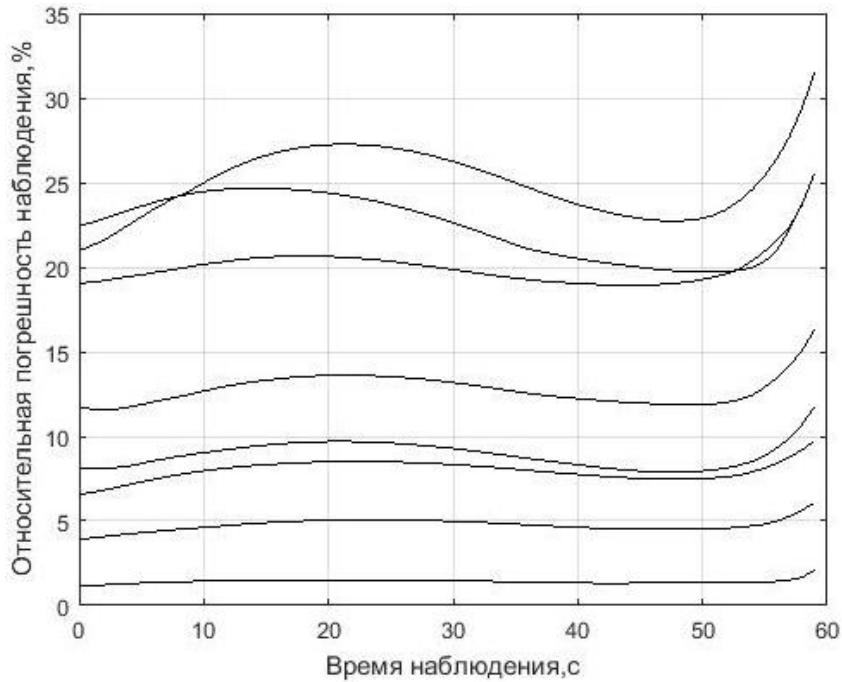


Рис. 1. Относительные погрешности наблюдения

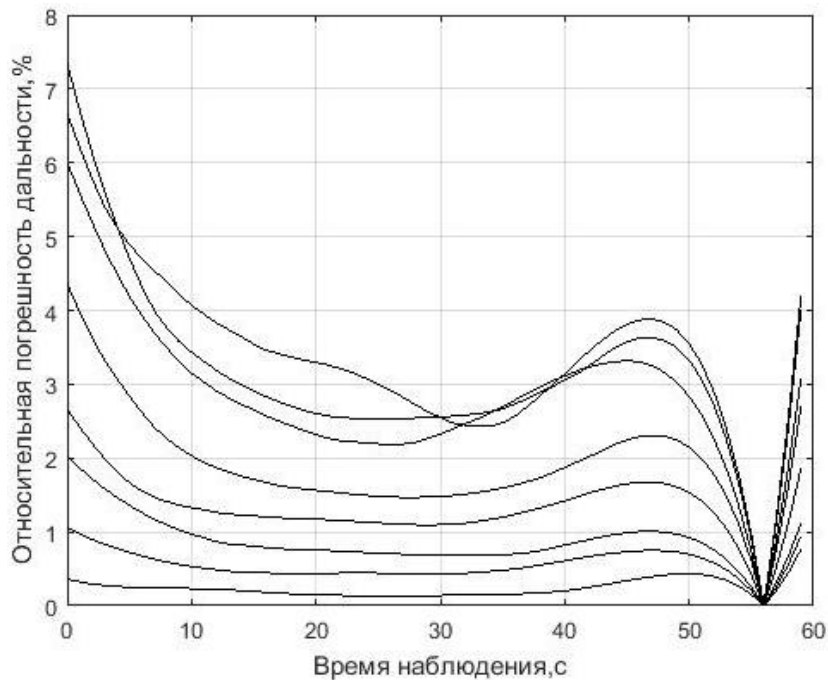


Рис. 2. Относительные погрешности определения текущей дальности

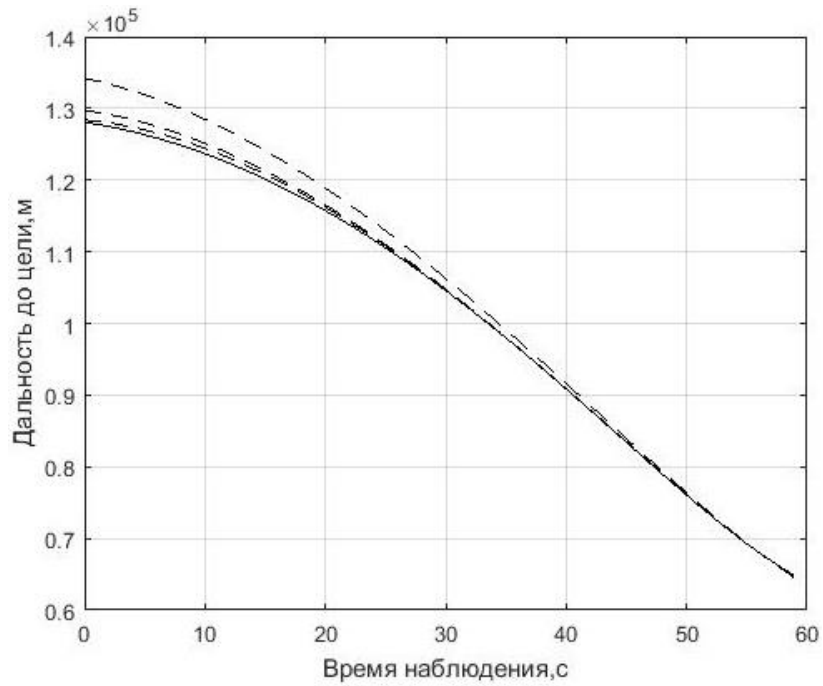


Рис. 3. Эволюция текущей дальности

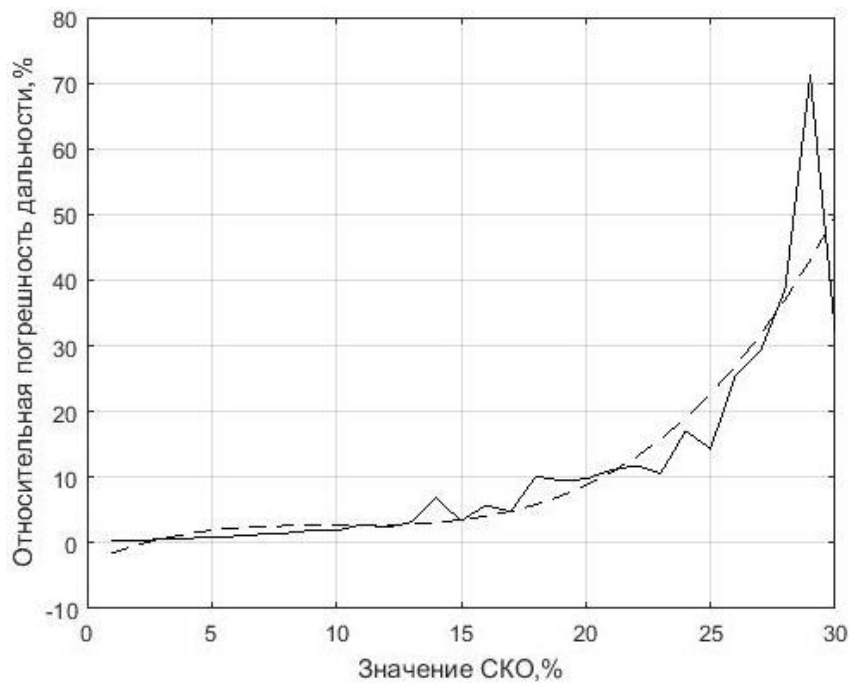


Рис. 4. Относительная погрешность дальности

На рис. 5-8 показаны результаты моделирования для случая 2.

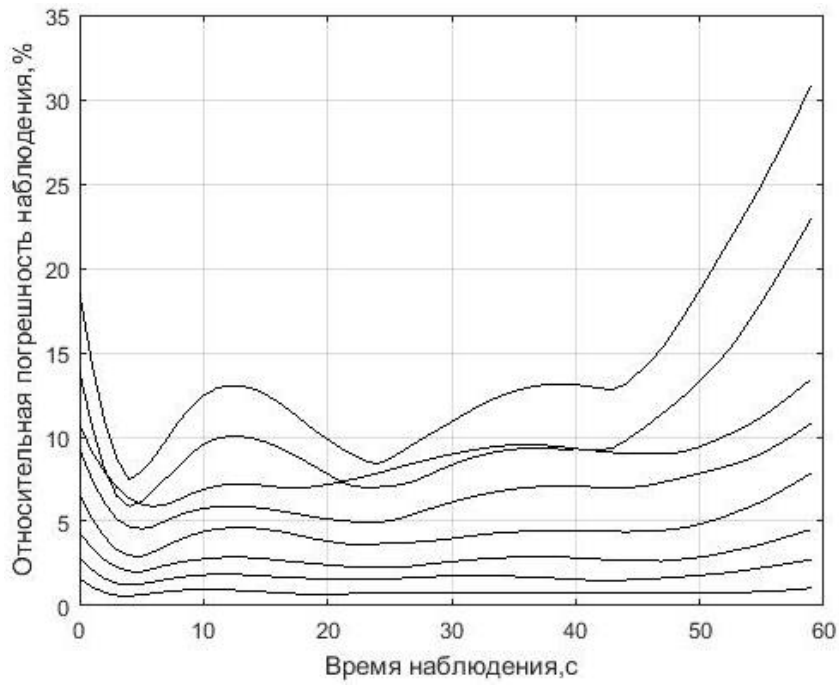


Рис. 5. Относительная погрешность наблюдения

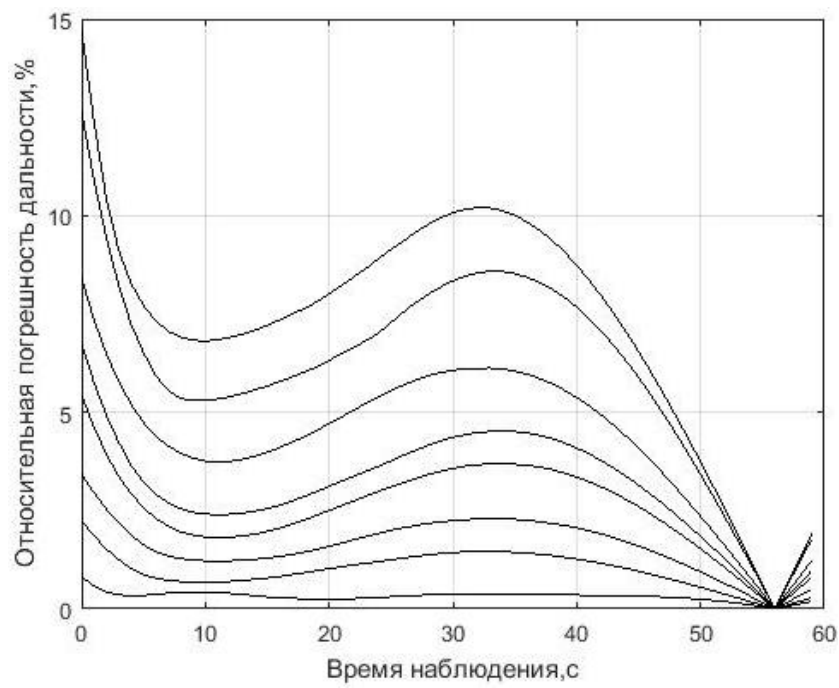


Рис. 6. Относительная погрешность дальности

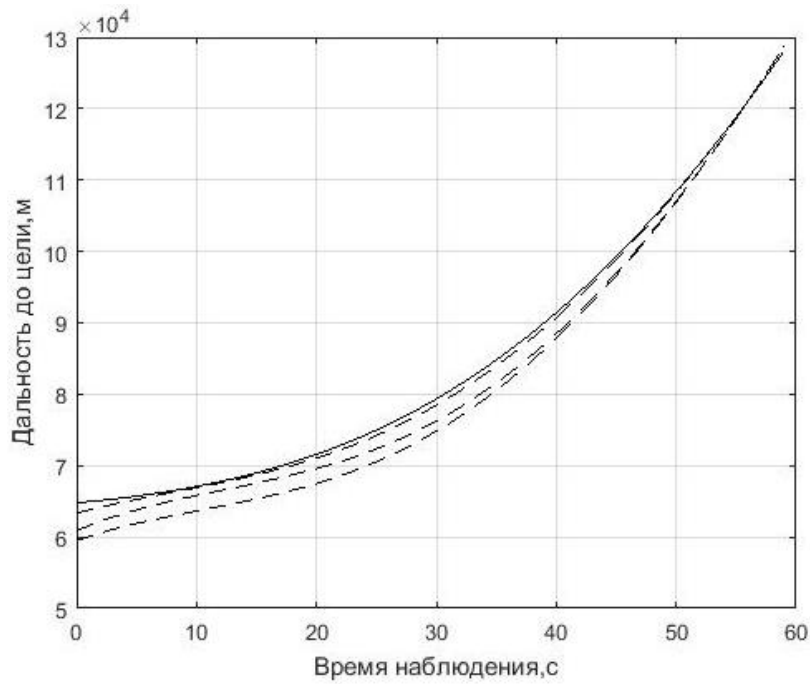


Рис. 7. Дальность до цели

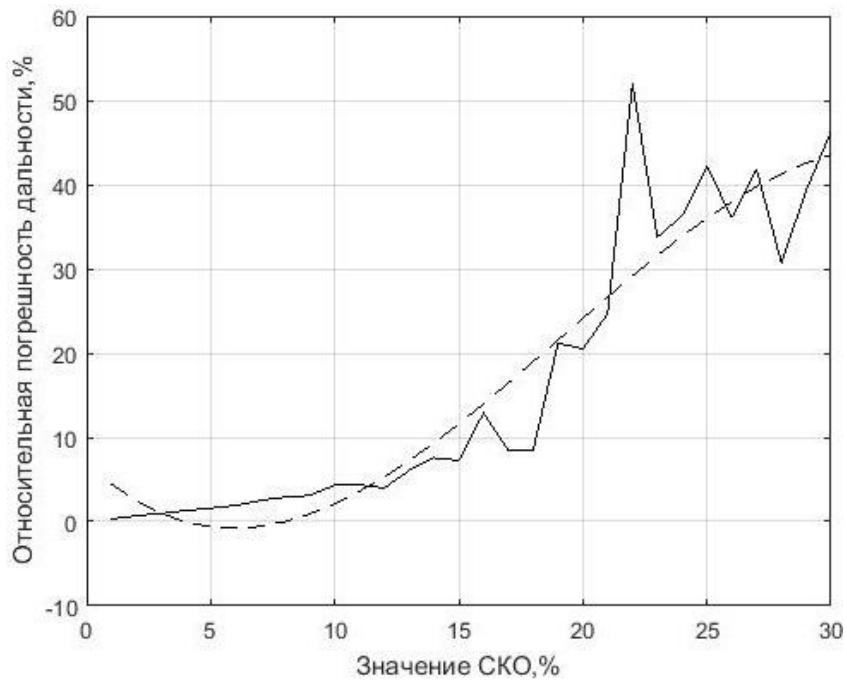


Рис. 8. Относительная погрешность дальности

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- из рис. 4 (случай 1) и рис. 8 (случай 2) видно, что с увеличением значения σ относительная погрешность оценивания дальности нелинейно возрастает,

при этом на большей части интервала наблюдения имеем удовлетворительную точность оценивания (погрешность оценивания не превышает 10%);

– из рис. 2 (случай 1) и рис. 6 (случай 2) видно, что известное значение дальности $D_* = D(57)$ выступает в роли стабилизирующего фактора, при этом можно отметить, что значение σ существенного влияния на величину области стабилизации не оказывает;

– из рис. 3 (случай 1) и рис. 7 (случай 2) видно, что метод позволяет формировать удовлетворительные по точности оценки текущей наклонной дальности до цели, при этом наибольшая погрешность оценивания приходится на начальный интервал наблюдения (это связано с тем, что значение D_* выбрано вблизи конца интервала наблюдения);

– сравнительный анализ (рис. 5-8) показывает, что изменение направления движения цели на обратное (с сохранением той же траектории) не оказывает существенного влияния на точность формирования оценок дальности.

8. Выводы

Таким образом, в статье развит новый метод однопозиционной автономной локации и навигации, позволяющий по энергетическим измерениям нормированного уровня входного сигнала (RSSI), образованного преимущественно прямым лучом, оценивать текущую наклонную дальность до движущейся излучающей цели. В отличие от известных методов, работоспособных лишь для случая прямолинейного равномерного движения, предлагаемый метод ориентирован на воздушные цели с криволинейным движением, дальность до которых может быть аппроксимирована обобщенной полиномиальной моделью с обоснованным числом степеней свободы. Для реализации разработанного метода необходимо использовать известное значение дальности для одного произвольного момента времени, принадлежащего интервалу наблюдения. Этот момент может быть связан со стартом ракеты, взлетом или посадкой воздушного объекта, моментом падения баллистической или космической цели и т.д.

Особенностью метода является его ориентация на АСИС, снабженные только каналом измерения уровня RSSI. При этом для создания информационной избыточности и, как следствие, повышения качественных характеристик формируемых оценок текущей дальности, а также для определения полного вектора состояния излучающей цели предложенный метод может быть внедрен в многопозиционную измерительную систему любого типа (триангуляционную, разностно-дальномерную, дальномерно-дальномерную, комбинированную и др.). Поскольку в методе не фигурируют пеленги (азимут и угол места), то его реализация не требует использования дорогостоящих громоздких антенных систем с высокой разрешающей способностью по угловым координатам. Совокупность малогабаритных энергетических измерителей с недорогими и слабонаправленными антеннами, в которых предполагается реализовать разработанный метод, позволит не только обеспечить требуемый энергетический потенциал, но и заданные точностные характеристики (за счет избыточных оценок дальности).

Известные современные подходы к достоверной регистрации уровня входного сигнала позволяют надеяться на то, что развитый метод найдет как самостоятельное применение, так и в виде дополнения к традиционным методам пассивной локации и навигации в некорректных условиях (например, при появлении цели в триангуляционно-некорректной области двухпозиционной угломерной системы [18]). Для стробирования мощностных измерений (с целью исключения аномальных ошибок) можно воспользоваться хорошо разработанным гипотезным подходом, который позволяет учесть возможные виды радиоконтакта «цель-АСИС» и ориентироваться на прогнозируемое (расчетное) приращение или убывание мощности за время между двумя радиоконтактами. С учетом сказанного, для селекции мощностных измерений могут быть использованы известные методы кластеризации [26, 27].

Наиболее эффективной реализации предложенного метода следует ожидать, когда регистрируемый уровень мощности образован

преимущественно прямым лучом, а также в условиях квазистационарности обобщенного энергетического коэффициента. В противном случае необходимо проводить предварительную обработку измерений, например, путем реализации предложенного гипотезно-кластерного подхода или выбирать временной интервал наблюдения такого размера, чтобы на нем выполнялось условие квазистационарности требуемых параметров радиолинии. Ввиду того, что метод оперирует не абсолютными, а нормированными уровнями RSSI, пропорциональное изменение уровня RSSI не нарушает работоспособности метода. Это обстоятельство могло бы стать основой для развития способа алгоритмической компенсации априорно неизвестного приращения мощности сигнала, вызванного случайными факторами (например, с компонентой мощности, обусловленной доплеровским эффектом [19]) и приводящего к пропорциональному изменению уровня входного сигнала на интервале наблюдения.

По аналогии с [10] развитый метод инвариантен к видам принимаемого сигнала с постоянной амплитудой (например, при частотной и фазовой модуляции); важно, чтобы изменение нормированного уровня этой амплитуды было связано только с изменением дальности до цели.

Литература

1. Мельников Ю.П., Попов С.В. Радиотехническая разведка. М.: Радиотехника. 2008.
2. Основы маневрирования кораблей / под ред. М. Скворцова. М.: Воениздат. 1966.
3. Хвощ В.А. Тактика подводных лодок. М.: Воениздат. 1989.
4. Lin X., Kirubarajan T., Bar-Shalom Y. and Maskell S. Comparison of EKF, Pseudomeasurement and Particle Filters for a Bearing-only Target Tracking Problem, in Proc. SPIE-Int. Soc. Optic. Eng. 2002. vol. 4728. pp. 240-250.
5. B.M. Miller, K.V. Stepanyan, A.B. Miller, K.V. Andreev and S.N. Khoroshenkikh. Optimal filter selection for UAV trajectory control problems. Proceedings of the

- 37-th Conference on Information Technology and Systems – 2013. Conference for Young Scientists and Engineers. IITP RAS, 1-6 September 2013. Kaliningrad. Russia. 2013. pp. 327-333.
6. V.J. Aidala and S.C. Nardone. Biased Estimation Properties of the Pseudolinear Tracking Filter. IEEE Transactions on Aerospace Electronic systems. vol. 18, no. 4. 1982. pp. 432-441.
7. K.S. Amelin and A.B. Miller. An Algorithm for Refinement of the Position of a Light UAV on the Basis of Kalman Filtering of Bearing Measurements. Journal of Communications Technology and Electronics. Vol. 59. No. 6. 2014. pp. 622-631.
8. Miller A., Miller B. Stochastic control of light UAV at landing with the aid of bearing-only observations. // Proceedings SPIE. Eight International Conference on Machine Vision (ICMV 2015), 2015. V. 9875. 987529. pp. 1-10. doi:10.1117/12.2228544A.
9. Karpenko S., Konovalenko I., Miller A., Miller B., Nikolaev D. UAV Control on the Basis of 3D Landmark Bearing-Only Observations. // Sensors 2015 [Special Issue]. 15(12). pp. 29802-29820. doi:10.3390/s151229768.
10. Медведев В.П. Исследование методов определения местоположения источников радиоизлучения с борта летательного аппарата / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Технологический институт Южного федерального университета. Таганрог. 2007.
11. Сытенький В.Д. Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. 2011. № 1. С. 69-75.
12. Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Ивакина С.С., Мозоль А.А. Оценивание параметров движения объекта на базе стационарного квазиавтономного пеленгатора // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 5. С. 92-99.
13. Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Ивакина С.С. Амплитудно-угломерная пассивная локация излучающей цели для нестационарного радиоканала // РЭ. 2016. Т. 61. № 3. С. 236-244.

14. Булычев Ю.Г., Мозоль А.А. Модифицированный угломерно-энергетический метод однопозиционной локации в условиях априорной неопределенности // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 4. С. 58-67.
15. Булычев В.Ю., Булычев Ю.Г., Ивакина С.С., Насенков И.Г. Угломерно-энергетический метод нестационарной пассивной локации на базе однопозиционной системы // Изв. РАН. ТиСУ. 2015 № 5. С. 122–129.
16. Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Ивакина С.С., Насенков И.Г. Пассивная локация группы движущихся целей одним стационарным пеленгатором с учетом априорной информации // АиТ. 2017. №1. С. 152-166.
17. Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Ивакина С.С., Насенков И.Г. Метод пассивно-энергетической локации и навигации в стационарной и нестационарной постановках // Радиотехника. 2015. № 6. С. 107-115.
18. Булычев Ю.Г., Ивакина С.С., Насенков И.Г. Обоснование возможности комбинированного применения угломерного и угломерно-мощностного методов пассивной локации // Радиотехника. 2015. № 3. С. 128-136.
19. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я. Ширмана. М.: Сов. радио. 1970. 561 с.
20. Коростелев А.А., Ключев Н.Ф., Мельник Ю.А. и др. Теоретические основы радиолокации / под ред. В.Е. Дулевича. 2-е изд. М.: Сов. радио. 1978. 608 с.
21. J.-E. Berg, R. Bownds, F. Lotse Path loss and fading models for microcells at 900 MHz. Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. May 1992. pp. 666-671.
22. Whitteker J.H. Measurements of path loss at 910 MHz for proposed microcell urban mobile systems // IEEE Trans. Veh. Technol. Aug. 1988. V. 37. pp. 125-129.
23. Börjeson H., Bergljung C., Olsson L.G. Outdoor microcell measurements at 1700 MHz. Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. May 1992. pp. 927-931.
24. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа. 1999. 576 с.
25. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь. 1986. 264 с.
26. Мандель И. Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и Статистика. 1988.

27. Уиллиамс У.Т., Ланс Д.Н. Методы иерархической классификации // Статистические методы для ЭВМ / Под ред. М.Б. Малютова. М.: Наука. 1986.
28. Lance G.N., Willams W.T. // *Comp. J.* 1967. № 9. Pp. 373.
29. Феоктистов Ю.А. и др. Теория и методы оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. М.: Радио и связь. 1988.
30. Быховский М.А. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. М.: Эко-Трендз. 2006. 376 с.
31. Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. М.: Радиотехника. 2009. 432 с.
32. Электронный ресурс: <http://pentagonus.ru/publ/18-1-0-546>.
33. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. Радио. 1978. 384 с.

Для цитирования:

Ю. Г. Булычев, А. А. Мозоль, А. Г. Кондрашов, А. В. Ячменев, А. С. Жук. Энергетический метод квазиоптимальной однопозиционной локации и навигации движущегося источника излучения с учетом априорной информации. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/15/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.15