

УДК 621.391.1

## АНАЛИЗ МОДИФИКАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПАССИВНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

Ю. Г. Булычев<sup>1</sup>, С. С. Ивакина<sup>1</sup>, А. А. Мозоль<sup>2</sup>, И. Г. Насенков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт "Градиент"»,  
344000, г. Ростов-на-Дону, просп. Соколова, 96

<sup>2</sup>Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» МВД России,  
344000, г. Ростов-на-Дону, ул. Добровольского, 11/7

<sup>3</sup>Концерн «Радиоэлектронные технологии»,  
109240, Москва, ул. Гончарная, 20/1, стр. 1  
E-mail: ProfBulychev@yandex.ru

Применительно к задачам пассивной дальнометрии развита одна из модификаций известного энергетического метода определения дальности до излучающей цели с частично известными параметрами движения на базе одной приёмной позиции. Для решения задачи используются только измерения мощности (амплитуды) принимаемого сигнала на заданной временной сетке без учёта пеленговой информации. Получены аналитические зависимости, позволяющие исследовать рабочую зону метода. Построен алгоритм формирования результирующей оценки дальности в текущем времени с учётом избыточности измерений. Приведены результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие возможность практической реализации предложенной модификации энергетического метода. Даны рекомендации по применению полученных результатов в многопозиционных системах пассивной локации.

*Ключевые слова:* дальнометрия, энергетический метод, рабочая зона, модель движения, дисперсия ошибки оценивания, метод наименьших квадратов.

DOI: 10.15372/AUT20160105

**Введение.** В последнее время появился ряд публикаций [1–7], посвящённых развитию энергетического метода решения задач пассивной дальнометрии для стационарных и подвижных излучающих целей (ИЦ) с использованием не только угловых, но и энергетических (мощностных или амплитудных) измерений применительно к однопозиционным, двухпозиционным и многопозиционным системам пассивной локации (МСПЛ) [8]. Энергетический метод инвариантен к различным видам излучаемого сигнала с постоянной огибающей, например к сигналам с линейно-частотной модуляцией и фазоманипулированным. Изменение огибающей (амплитуды) сигнала на приёмной стороне обусловлено длиной трассы, условиями распространения сигнала, особенностями построения измерительной позиции и принятым способом сканирования.

В работах [1–6] показано, что привлечение энергетических измерений повышает эффективность функционирования системы в различных условиях наблюдения. В [5] введение энергетического измерительного канала обосновано необходимостью устранения триангуляционно-некорректных областей в двухпозиционных триангуляционных измерительных системах локации, так как при попадании в них цели погрешности оценивания дальности могут быть сколь угодно большими. Приводятся результаты теоретического и экспериментального исследований, подтверждающие повышение точности оценивания дальности для триангуляционно-некорректных областей двухпозиционной системы локации при применении энергетического метода расчёта.

Практика показывает, что энергетические измерения особенно важны для систем, при функционировании которых возможна периодическая аномальность извлекаемой пеленго-

вой информации (например, в системах радиотехнической разведки и других [7]). Данное явление существенно зависит от способа обзора пространства, характеристик измерителя, наличия прямой видимости, манёвра цели и многих других факторов. Совместное использование угловых и энергетических измерений позволит обеспечить построение непрерывных трасс и других параметров движения сопровождаемых целей.

В настоящее время не ослабевает интерес к разработке адаптивных МСПЛ в виде сети позиций с малогабаритными ненаправленными или слабонаправленными антеннами, способной реализовать известный разностно-дальномерный метод (РДМ) определения местоположения излучающей цели, а также другие альтернативные методы. Из [8] видно, что реализация РДМ, предполагающего совместную обработку принимаемых сигналов всех позиций, весьма проблематична на практике в условиях возможной «деградации» структуры МСПЛ. Деградация зачастую связана с причинами естественного и искусственного происхождения, которые могут приводить к кратковременным и длительным сбоям в работе аппаратуры, выходу из строя отдельных позиций и линий связи, нарушению условий синхронизации, необходимых для совместной обработки сигналов, и т. д.

Для обеспечения возможности устойчивого функционирования МСПЛ в условиях деградации структуры необходимо помимо РДМ привлекать альтернативные методы определения местоположения излучающей цели, основанные на других физических принципах. К их числу можно отнести указанный выше энергетический метод [1–7], при реализации которого удаётся сформировать отдельные оценки дальности до цели относительно каждой позиции (эти оценки используются далее для построения результирующей оценки местоположения цели). Однако данный метод имеет жёсткие ограничения на точность пеленгования и ориентирован в первую очередь на узконаправленные и, как следствие, дорогостоящие антенны.

В предлагаемой работе развивается одна из модификаций энергетического метода пассивной дальнометрии для целей с частично известными параметрами движения (ЧИПД) по результатам измерения лишь уровня сигнала без привлечения пеленговой информации. Далее берём во внимание только мощностные измерения, поскольку случай амплитудных измерений не имеет принципиальных отличий.

**Постановка задачи.** Рассмотрим декартовую систему координат  $XOY$ , в которой осуществляется движение цели (рис. 1). Закон движения цели представим в векторном виде:  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \boldsymbol{\nu}t$ ,  $t \in [0, T]$ , где  $\mathbf{r} = [x, y]^T$ ,  $\mathbf{r}_0 = [x_0, y_0]^T$ ,  $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}(0)$ ,  $\boldsymbol{\nu}$  — вектор скорости,  $\nu = \|\boldsymbol{\nu}\|$  — величина скорости (полагаются известными её математическое ожидание  $m_\nu = \langle \nu \rangle$  и дисперсия  $\sigma_\nu^2$ ).

Принятая модель прямолинейного равномерного движения (имеется в виду цель с ЧИПД [9–11]) для небольших временных отрезков  $[0, T]$  является весьма распространён-

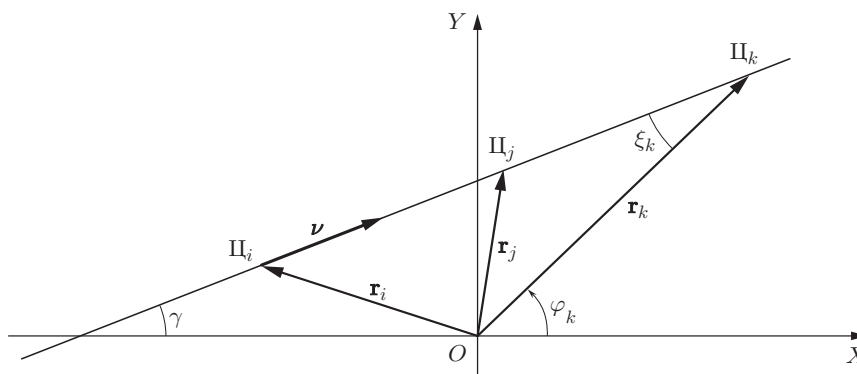


Рис. 1. Геометрия задачи

ной на практике, особенно для ИЦ, осуществляющих барражирование вдоль заданных направлений, например при реализации метода синтезирования апертуры. Это относится к самолётам, беспилотным летательным аппаратам, надводным и подводным целям, космическим аппаратам и др. Для таких целей зачастую имеется банк данных, характеризующих возможные параметры их движения и излучения. Так, в задачах радиотехнической разведки нередко определяют величину скорости ИЦ на основе этого банка данных по результатам оценки параметров принимаемых сигналов [7].

Введём временную сетку  $\{t_n\}_{n=1}^N$  ( $t_n \in [0, T]$ ), к которой привязаны измерения мощности принимаемого сигнала. На рис. 1  $\Pi_i$ ,  $\Pi_j$  и  $\Pi_k$  обозначают положения цели в различные моменты времени:  $t_i$ ,  $t_j$  и  $t_k$ , при этом  $\Delta t_{ij} = |t_j - t_i| = |t_k - t_j| = \Delta t_{jk}$ . Полагаем, что в моменты времени  $\{t_n\}_{n=1}^N$  осуществляются измерения мощности  $p_n = p(t_n)$  принимаемого сигнала. Введём векторную модель наблюдения  $\tilde{\mathbf{z}}_{ijk} = \mathbf{z}_{ijk} + \Delta \mathbf{z}_{ijk}$ , где  $\tilde{\mathbf{z}}_{ijk} = [\tilde{\nu}, \tilde{p}_i, \tilde{p}_j, \tilde{p}_k]^T$ ;  $\mathbf{z}_{ijk} = [\nu, p_i, p_j, p_k]^T$ ;  $\Delta \mathbf{z}_{ijk} = [\Delta \nu, \Delta p_i, \Delta p_j, \Delta p_k]^T$  — вектор случайных ошибок с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей  $\mathbf{K}_{\mathbf{z}_{ijk}}$  соответствующего размера. Если величина скорости  $\nu$  является детерминированной и известной по условию задачи, то примем  $m_\nu = \nu$  и  $\sigma_\nu^2 = 0$ .

На основании известного уравнения [5] будем полагать

$$p = \mu r^{-2}, \quad r = \|\mathbf{r}\|, \quad \mu(t) = \mu = \text{const} \forall t \in [0, T]. \quad (1)$$

Последнее ограничение зачастую принимается на практике на небольших интервалах наблюдения [1–5], для которых указанная модель движения излучающей цели считается адекватной.

Требуется построить модифицированный энергетический метод определения дальности до излучающей цели с ЧИПД без привлечения пеленговой информации, исследовать его рабочую зону, проанализировать возможность вовлечения избыточных измерений для повышения точности оценивания и численным экспериментом подтвердить применимость метода на практике, указать пути его реализации в МСПЛ.

**Решение задачи.** Рассмотрим треугольник  $O\Pi_i\Pi_k$  (см. рис. 1). Так как  $\nu \Delta t_{ij} = \nu \Delta t_{jk}$ , прямая  $O\Pi_j$  является медианой треугольника  $O\Pi_i\Pi_k$  и, следовательно,  $r_j = 2^{-1}[2r_i^2 + 2r_k^2 - (2\nu \Delta t_{ij})^2]^{1/2}$ , где  $r_i = \|\mathbf{r}_i\|$ ,  $r_j = \|\mathbf{r}_j\|$ ,  $r_k = \|\mathbf{r}_k\|$ . Запишем эту формулу в виде

$$r_j^2 = 4^{-1}[2(r_i^2 + r_k^2) - 4s_{ij}^2]. \quad (2)$$

Здесь  $s_{ij} = \nu \Delta t_{ij} = \nu \Delta t_{jk} = s_{jk}$  — расстояние, пройденное целью за время  $\Delta t_{ij} = \Delta t_{jk}$ .

Теперь с учётом (1) сформируем следующие отношения:  $p_i/p_j = (\mu_i r_i^{-2})(r_j^2 \mu_j^{-1}) = r_j^2/r_i^2$ ;  $p_i/p_k = (\mu_i r_i^{-2})(r_k^2 \mu_k^{-1}) = r_k^2/r_i^2$ ;  $p_j/p_k = (\mu_j r_j^{-2})(r_k^2 \mu_k^{-1}) = r_k^2/r_j^2$ .

Данные равенства представим в виде

$$r_i^2 = r_j^2 p_j p_i^{-1}; \quad r_i^2 = r_k^2 p_k p_i^{-1}; \quad r_j^2 = r_k^2 p_k p_j^{-1}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) имеем  $r_k^2 p_k p_j^{-1} = 2^{-1} r_k^2 p_k p_i^{-1} + 2^{-1} r_k^2 - s_{ij}^2$ . Откуда вытекает формула для искомой дальности

$$r_k = [2p_i p_j s_{ij}^2 (p_i p_j + p_j p_k - 2p_i p_k)^{-1}]^{1/2}. \quad (4)$$

Аналогичным путём можно построить выражения для дальностей

$$r_i = [2p_j p_k s_{ij}^2 (p_i p_j + p_j p_k - 2p_i p_k)^{-1}]^{1/2}, \quad r_j = [2p_i p_k s_{ij}^2 (p_i p_j + p_j p_k - 2p_i p_k)^{-1}]^{1/2}.$$

Таким образом, полученные формулы позволяют по измерениям мощностей принимаемого сигнала  $p_i$ ,  $p_j$  и  $p_k$  вычислить интересующие нас дальности  $r_i$ ,  $r_j$  и  $r_k$  без привлечения пеленговой информации.

Следует указать на одну важную особенность: если мощности  $p_i$ ,  $p_j$  и  $p_k$  известны с точностью до некоторого общего неизвестного коэффициента пропорциональности  $\lambda$  ( $\tilde{p}_i = \lambda p_i$ ,  $\tilde{p}_j = \lambda p_j$ ,  $\tilde{p}_k = \lambda p_k$ ), то вычисления по формуле (4) дадут правильный результат независимо от величины коэффициента  $\lambda$ . На практике появление  $\lambda$  может быть связано с действием некоторого неучитываемого фактора, имеющего сильную корреляцию на интервале наблюдения  $[0, T]$ . Подобного рода инвариантность предлагаемого метода является одним из его достоинств. Однако следует помнить, что результат зависит от величины интервала наблюдения, на котором принята модель адекватна реальному движению цели.

**Рабочая зона модифицированного энергетического метода и её анализ.** Представим формулу (4) в виде  $r_k = f(\mathbf{z}_{ijk})$ , где  $f(\cdot)$  — известная функция от векторного аргумента  $\mathbf{z}_{ijk}$ . В соответствии с общей формулой учтём влияние случайных ошибок измерений на точность вычисления дальности. Согласно методу линейных приближений дисперсию ошибки оценивания  $r_k$  запишем как

$$\sigma_{r_k}^2 = \sigma_{r_k}^2(i, j, k) = (\mathbf{F}_{ijk}^T \mathbf{K}_{\mathbf{z}_{ijk}} \mathbf{F}_{ijk}) \mathbf{m}_{\mathbf{z}_{ijk}}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{m}_{\mathbf{z}_{ijk}} = \langle \mathbf{z}_{ijk} \rangle$  — математическое ожидание вектора  $\tilde{\mathbf{z}}_{ijk}$ ;  $(\cdot)_{\mathbf{m}_{\mathbf{z}_{ijk}}}$  — символ, указывающий на то, что вычисления в круглых скобках проводятся путём подстановки координат вектора  $\mathbf{m}_{\mathbf{z}_{ijk}}$ ;  $\mathbf{F}_{ijk} = [\partial r_k / \partial \mathbf{z}_{ijk}]$  — вектор-столбец частных производных от  $r_k = f(\mathbf{z}_{ijk})$  по координатам вектора  $\mathbf{z}_{ijk}$ .

Формула (5) позволяет априорно оценить точностные характеристики предлагаемого метода вычисления дальности с учётом случайного характера ошибок измерений и основных параметров решаемой задачи. Для оценки потенциальных возможностей метода в первом приближении ограничимся случаем некоррелируемых и равноточных измерений.

Непосредственно из (5) с учётом (4) вытекает формула

$$\sigma_{r_k}^2 = r_k^2 \left[ \frac{p_k^2(p_j^2 + 4p_i^2 - 2p_i p_j)}{2(p_i p_j + p_j p_k - 2p_i p_k)^2} \varepsilon_p^2 + \varepsilon_\nu^2 \right], \quad (6)$$

где  $\varepsilon_p^2 = \sigma_{p_i}^2 p_i^{-2} = \sigma_{p_j}^2 p_j^{-2} = \sigma_{p_k}^2 p_k^{-2}$  — относительная погрешность измерения мощности;  $\varepsilon_\nu^2 = \sigma_\nu^2 \nu^{-2}$  — относительная погрешность задания скорости.

Для построения рабочей зоны развиваемого метода нам потребуется относительная погрешность вычисления дальности

$$\varepsilon_{r_k}^2 = \sigma_{r_k}^2 r_k^{-2} = \frac{p_k^2(p_j^2 + 4p_i^2 - 2p_i p_j)}{2(p_i p_j + p_j p_k - 2p_i p_k)^2} \varepsilon_p^2 + \varepsilon_\nu^2. \quad (7)$$

Так как  $p_i p_j + p_j p_k - 2p_i p_k = 2s_{ij}^2 p_i p_j r_k^{-2}$ , преобразуем последнее выражение к виду  $\varepsilon_{r_k}^2 = 8^{-1} s_{ij}^{-4} [4(r_j^2)^2 + (r_i^2)^2 - 2(r_i r_j)^2] \varepsilon_p^2 + \varepsilon_\nu^2$  и перейдём к полярным координатам  $(r_k, \varphi_k)$ , для чего воспользуемся очевидными соотношениями (см. рис. 1)

$$r_i^2 = r_k^2 + (2s_{ij})^2 - 4r_k s_{ij} \cos \xi_k, \quad r_j^2 = r_k^2 + s_{ij}^2 - 2r_k s_{ij} \cos \xi_k, \quad \xi_k = \varphi_k - \gamma.$$

С учётом этих соотношений в новых координатах  $(r_k, \varphi_k)$  относительная погрешность задаётся формулой

$$\varepsilon_{r_k}^2 = 8^{-1} s_{ij}^{-4} [3r_k^4 - 12r_k^3 s_{ij} \cos \xi_k + 2r_k^2 s_{ij}^2 (3 + 8 \cos^2 \xi_k) - 24r_k s_{ij}^3 \cos \xi_k + 12s_{ij}^4] \varepsilon_p^2 + \varepsilon_\nu^2. \quad (8)$$

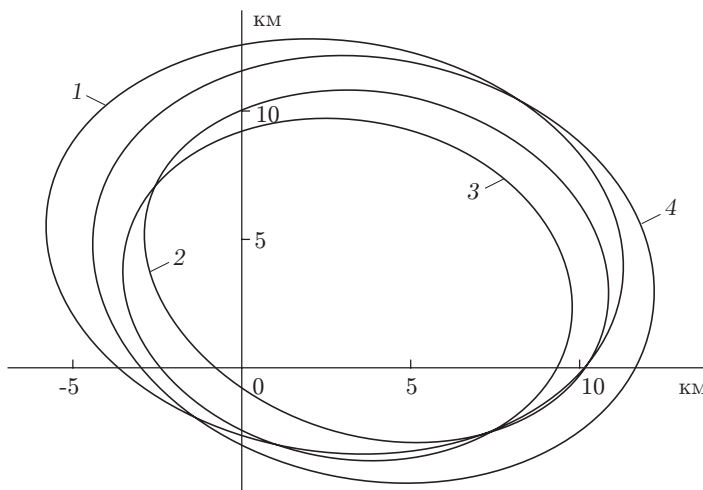


Рис. 2. Сравнение рабочих зон

Рабочую зону развиваемого метода определяем как замкнутую область ( $\varepsilon_{r_k}^2 \leq \varepsilon_r^2$ ), ограниченную эллипсом  $\varepsilon_{r_k}^2 = \varepsilon_r^2$ , где  $\varepsilon_r > 0$  соответствует максимально допустимой погрешности определения дальности.

На рис. 2 изображены для сравнения четыре рабочие зоны для исходных данных  $\Delta t_{ij} = 20$  с,  $\varepsilon_\nu = 3$  %,  $\varepsilon_r = 10$  %:

- 1 —  $\nu = 250$  м · с<sup>-1</sup>,  $\gamma = 60^\circ$ ,  $\varepsilon_p = 5$  %;
- 2 —  $\nu = 250$  м · с<sup>-1</sup>,  $\gamma = 45^\circ$ ,  $\varepsilon_p = 7$  %;
- 3 —  $\nu = 200$  м · с<sup>-1</sup>,  $\gamma = 45^\circ$ ,  $\varepsilon_p = 5$  %;
- 4 —  $\nu = 250$  м · с<sup>-1</sup>,  $\gamma = 45^\circ$ ,  $\varepsilon_p = 5$  %.

Из рисунка видно, что при увеличении погрешности  $\varepsilon_p$  и уменьшении перемещения  $s_{ij} = \nu \Delta t_{ij}$  рабочая зона энергетического метода сокращается в размерах.

**Алгоритм вычисления дальности.** Исходными данными для расчёта дальности являются массив мощностей  $\tilde{p}_n$ , измеренных в моменты времени  $t_n$  ( $n = \overline{1, N}$ ) с погрешностью  $\varepsilon_{pn}$  (%), и скорость цели  $\nu$ . Рассмотрим процедуру формирования результирующей оценки дальности в текущем дискретном времени  $t_k$ , сглаживая первичные измерения мощности по выборке нарастающего объёма методом наименьших квадратов (МНК).

Начиная с третьего момента времени  $t_3$  ведётся расчёт дальности по формуле (4). Для произвольного  $t_k$  единичную оценку дальности можно получить с использованием либо последних трёх замеров, положив в формуле (4)  $i = k - 2$  и  $j = k - 1$  (первый вариант), либо всех замеров, соответствующих временной сетке  $t_1, t_2, \dots, t_{k-1}, t_k$ , для всевозможных пар  $(\Delta t_{ij}, \Delta t_{jk} \forall i, j \in \overline{1, k-1}, \Delta t_{ij} = |t_j - t_i| = |t_k - t_j| = \Delta t_{jk})$  и усреднением полученных единичных оценок (второй вариант). В последнем варианте перебираются все тройки  $(t_i, t_j, t_k)$  равноотстоящих узлов, в которых фиксирован текущий момент времени  $t_k$  ( $k \geq 3$ ). Число таких комбинаций  $L_k = [(k-1)/2]$ , где  $[\cdot]$  — целая часть вещественного числа. Единичная оценка дальности  $\hat{r}_k^l$  для  $l$ -й тройки, где  $l = \overline{1, L_k}$ , рассчитывается по формуле (4), в которой заменяем:  $i \rightarrow k - 2l$ ,  $j \rightarrow k - l$ ,  $\Delta t_{ij} \rightarrow \Delta t_{k-2l, k-l} = \Delta t_l$ ,  $s_{ij} \rightarrow s_l = \nu \Delta t_l$ . Для построения результирующей оценки дальности  $r_k^*$  на базе единичных оценок  $\hat{r}_k^l$ ,  $l = \overline{1, L_k}$ , воспользуемся известным МНК для случая коррелированных измерений. Пусть  $\hat{\mathbf{r}}_k = [\hat{r}_k^l, l = \overline{1, L_k}]^T$  — вектор единичных оценок, а  $\mathbf{K}_r$  — корреляционная матрица ошибок оценивания, элементы которой находятся в соответствии с методом

линейных приближений. Тогда для результирующей оценки имеем

$$r_k^* = \left( \sum_{i=1}^{L_k} \sum_{j=1}^{L_k} w_{ij} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \hat{\mathbf{r}}_k, \quad (9)$$

где  $\mathbf{W} = [w_{ij}, i, j = \overline{1, L_k}] = \mathbf{K}_r^{-1}$  — матрица весовых коэффициентов;  $\mathbf{A} = [1, 1, \dots, 1]^T$  — единичный вектор-столбец размерности  $L_k$ .

При равнооточных и некоррелированных измерениях ( $\mathbf{K}_r = \text{diag}\{\sigma_r^2, \sigma_r^2, \dots, \sigma_r^2\}$ ) формула (9) с учётом (4) принимает вид

$$r_k^* = \frac{1}{L_k} \sum_{l=1}^{L_k} \hat{r}_k^l = \frac{1}{L_k} \sum_{l=1}^{L_k} \frac{s_l \sqrt{2p_k - 2lp_k - l}}{\sqrt{p_k - 2lp_k - l + p_k - lp_k - 2p_k - 2lp_k}}. \quad (10)$$

Предложенные варианты практической реализации энергетического метода являются далеко не единственными. Для построения алгоритмов оценивания могут применяться различные модификации МНК, квазиправдоподобные оценки, робастные оценки, а также известные методы фильтрации.

**Численный эксперимент.** Пусть  $x_0 = -3 \cdot 10^4$  м,  $y_0 = 3 \cdot 10^4$  м,  $z_0 = 3,5 \cdot 10^3$  м,  $\nu = 200$  м·с<sup>-1</sup>,  $T = 200$  с, цель движется в направлении на пассивный дальномер,  $\Delta t = 10$  с,  $\varepsilon_p = 0,3$  %. Погрешности измерений моделировались с использованием датчика случайных чисел. Мощностные измерения сглаживались полиномом второй степени. Расчёт дальности производился по двум вариантам: по формуле (4) и с усреднением избыточных измерений по формуле (10). На рис. 3 приведены результаты моделирования: кривые 1 соответствуют расчёту по первому варианту, 2 — по второму, 3 — реальная дальность. Из рисунка следует, что при увеличении интервала наблюдения и использовании множества измерений для расчёта текущей дальности относительная погрешность результата уменьшается.

**Применение модифицированного энергетического метода к многопозиционным системам пассивной локализации.** Как указывалось во введении, энергетический метод может служить источником повышения устойчивости функционирования МСПЛ в условиях деградации её структуры. Поскольку разработанная модификация данного метода не предполагает использования информации о пеленгах ИЦ относительно приёмных позиций, то учитывать сформированные единичные оценки дальностей (типа (9), (10)) для построения результирующей оценки местоположения цели возможно только в рамках известного дальномерного метода для МСПЛ [12]. Согласно этому методу при выполнении определённых условий три сферы и более дают общую точку пересечения, которая

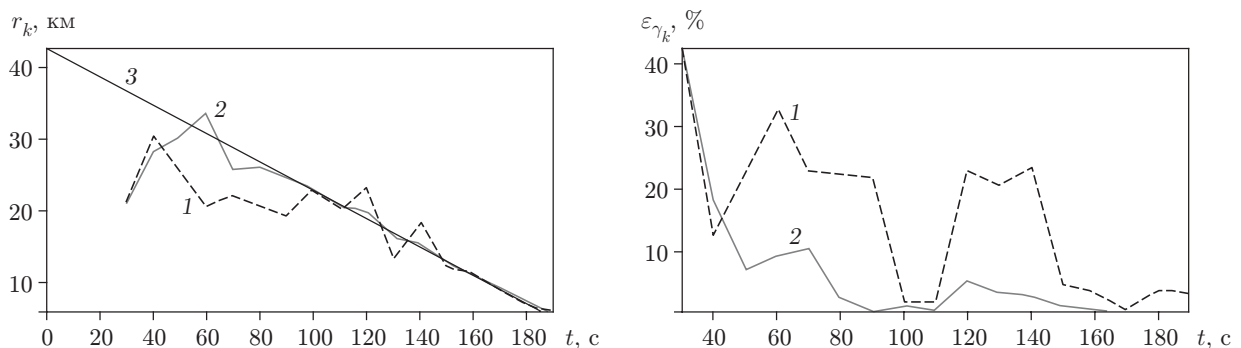


Рис. 3. Расчёт дальности

и соответствует искомому местоположению излучающей цели. Для случая, когда МСПЛ состоит из трёх позиций, имеем классическую задачу трилатерации [13].

Вышеизложенное относится лишь к случаю, когда исключаются ошибки вычисления единичных дальностей по формуле (9). В противном случае при учёте указанных ошибок нахождение оценки местоположения цели в единой декартовой системе координат  $XYZ$  для момента времени  $t_k$  может основываться на следующем правиле, предполагающем минимизацию взвешенных невязок:

$$(\overset{*}{x}_k, \overset{*}{y}_k, \overset{*}{z}_k) = \arg \min_{x_k, y_k, z_k} \delta J_k, \quad (11)$$

где

$$\delta J_k = \sum_{m=1}^M \delta J_{km} = \sum_{m=1}^M w_{km} \left\{ r_{km}^* - [(x_k - \rho_m^x)^2 + (y_k - \rho_m^y)^2 + (z_k - \rho_m^z)^2]^{1/2} \right\}^2. \quad (12)$$

В формулах (11) и (12) принято:  $(\overset{*}{x}_k, \overset{*}{y}_k, \overset{*}{z}_k)$  — вектор оценок местоположения цели;  $(\rho_m^x, \rho_m^y, \rho_m^z)$  — вектор декартовых координат  $m$ -й позиции МСПЛ;  $w_{km}$  — неотрицательные веса, которые находятся с учётом (5)–(8);  $r_{km}^*$  — единичная оценка дальности цели относительно  $m$ -й позиции МСПЛ, полученная с учётом формулы (9).

**Заключение.** Развитый модифицированный энергетический метод может использоваться как самостоятельно, так и в комплексе с известными методами пассивной дальнометрии [8]. Первый случай актуален, когда в измерительной системе единственным источником достоверной информации является энергетический канал (например, однопозиционная система с ненаправленной или слабонаправленной антенной).

Второй случай позволяет рассматривать энергетический метод как альтернативный при построении комплексного алгоритма функционирования интеллектуальной МСПЛ, способной надёжно функционировать в самых различных условиях. Основу такого алгоритма помимо предлагаемого метода могут составить угломерно-энергетический [1–7] и широко применяющиеся на практике пассивные методы [8, 12, 13]: дальномерный, разностно-дальномерный, триангуляционный и другие, а также их различные модификации.

Основными ограничениями метода являются наличие участка барражирования излучающей цели и знание величины скорости. Последний недостаток в некоторых случаях не принципиален, если предлагаемый энергетический дальномер сопрягается с другими разнородными измерителями, позволяющими формировать искомую оценку скорости.

При некоторых ограничениях предложенная модификация энергетического метода возможна и при наличии узконаправленных антенн, например антенн кругового обзора, что подтверждается данными натурных экспериментов. Однако при этом возникает необходимость стробирования измерений уровня принимаемого сигнала с учётом возможных максимального приращения этого уровня и основных ориентаций главных и боковых лепестков диаграмм направленности передающей и приёмной антенн. Такое стробирование позволяет отсеять аномальные измерения и выделить в единый массив только те из них, которые могут быть приняты в качестве исходных данных для реализации предложенного метода.

В любом конкретном случае вероятность применения развитого модифицированного энергетического метода должна подтверждаться как полученными теоретическими результатами, так и данными экспериментов. На наш взгляд, именно вопросы, связанные со стробированием энергетических измерений с учётом имеющейся априорной информации об условиях наблюдения излучающей цели, могут составлять теоретический и практический интерес.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Евдокимов Ю. Ф., Медведев В. П.** Амплитудная система определения местоположения источников излучения с использованием метода наименьших квадратов и исследование ее точности // Телекоммуникации. 2003. № 11. С. 34–37.
2. **Уфаев В. А., Афанасьев В. И., Разиньков С. П.** Оценка координат источника радиолучения на основе измерений амплитуды электромагнитного поля // Радиотехника. 2003. № 10. С. 71–73.
3. **Булычев Ю. Г., Мозоль А. А., Вернигора В. Н.** Оперативный метод определения дальности при пеленговании цели с частично известными параметрами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010. № 1. С. 24–26.
4. **Сытенький В. Д.** Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2011. № 1. С. 69–75.
5. **Булычев В. Ю., Булычев Ю. Г., Ивакина С. С.** Пассивная локация на основе угловых и мощностных измерений системы пеленгаторов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 1. С. 65–73.
6. **Мельников Ю. П., Попов С. В.** Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. М.: Радиотехника, 2008. 432 с.
7. **Булычев Ю. Г., Булычев В. Ю., Ивакина С. С., Насенков И. Г.** Амплитудно-угломерный метод нестационарной пассивной локации с учётом частично известных параметров движения цели // Автометрия. 2015. 51, № 3. С. 70–79.
8. **Черняк В. С.** Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
9. **Основы маневрирования кораблей** /Под ред. М. Скворцова. М.: Воениздат, 1966. 270 с.
10. **Хвоц В. А.** Тактика подводных лодок. М.: Воениздат, 1989. 264 с.
11. **Макухина Т. П., Миленький А. В., Натальченко О. С. и др.** Оценка текущих координат движущегося объекта по данным пеленгования // Вопросы радиоэлектроники. Сер. АСУПР. 1992. Вып. 2. С. 3–7.
12. **Кондратьев В. С., Котов А. Ф., Марков Л. Н.** Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
13. **Sturgess B. N., Carey F. T.** Trilateration // The Surveying Handbook /Eds. R. C. Brinker, R. Minnick. N. Y.: Chapman & Hall, 1995. Ch. 12. P. 234–270.

*Поступила в редакцию 28 октября 2014 г.*

---