DOI https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.8
УДК 621.396:621.391

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ КЛАСТЕРНО-ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ОЦЕНИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Ю. Г. Булычев, В. Ю. Булычев, Е. Н. Чепель

**Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент»,
344000, Ростов-на-Дону, пр. Соколова, д. 96**

Статья поступила в редакцию 26 марта 2021 г.

Аннотация. Развит модифицированный метод триангуляционного оценивания для случая априорной неопределенности, основанный на применении принципов «размножения» единичных отметок местоположения цели и их последующей «кластеризации». Приводятся различные критерии оптимальности обнаружения недостоверных измерительных каналов и алгоритмы формирования результирующей оценки местоположения цели. Даны результаты сравнительного анализа этих алгоритмов по точности и оперативности.

Ключевые слова: источник излучения, триангуляционная система пассивной локации, местоположение цели, пеленги, кластер, селекция, принцип «размножения», принцип «кластеризации», критерии оптимальности.

Abstract. Triangulate estimation modified method, based on “increasing” conception of target location ordinary marks and their following “clusterization”, for expected uncertainty modification is developed. Various tests for detection optimality of questionable measuring channels and consequent estimate generation algorithms of target location are given. Comparison results of these algorithms in accuracy and operational efficiency are presented.

Key words: emission source, passive location triangulate system, target location, bearings, cluster, gating, “increasing” conception, “clusterization” conception, tests for optimality.

Введение

В работах [1,2] применительно к триангуляционной системе пассивной локации (ТСПЛ) развит квазиоптимальный кластерно-вариационный метод оценивания местоположения источника излучения (цели) в условиях существенной неопределенности. Он является альтернативным по отношению к известным методам пассивной локации (см., например, [3-15]) и позволяет формировать устойчивые оценки при отсутствии достоверных знаний о законах распределения ошибок измерений, наличии неизвестных аномальных ошибок измерений (АОИ) и «деградации» структуры системы. В [1,2] для борьбы с АОИ используются принципы «размножения» и «кластеризации» частных отметок. В [1] изложен сам принцип формирования семейства частных отметок, но отсутствует эффективное правило их объединения с целью формирования результирующей оценки местоположения цели. Этот недостаток в определенной степени устранен в работе [2], где предложен алгоритм отбора оптимального кластера, позволяющий обнаружить недостоверные измерительные каналы, а также формировать устойчивую к АОИ результирующую оценку. Однако в [2] вводится жесткое ограничение: должно быть заранее задано число кластеров разбиения частных отметок. Кроме того, в [2] не учитывается возможность выбора других более эффективных критериев выявления недостоверных каналов и построения результирующей оценки, не исследованы вопросы декомпозиции и оперативности формирования результирующей оценки.

В предлагаемой работе дается дальнейшее развитие квазиоптимального кластерно-вариационного метода [1,2], устраняющее отмеченные ограничения и недостатки.

1. Суть принципов размножения и кластеризации

В более простой, компактной и доступной для понимания форме изложим основные положения метода [2], которые нам потребуются в ходе его модификации. В декартовой системе координат XYZ рассматривается ТСПЛ с позициями ($\Pi_m, m=\overline{1,M}$), положение которых задаётся векторами

$\boldsymbol{\xi}_m = [x_m, y_m, z_m]^{\mathrm{T}}$. Местоположение цели характеризуется вектором $\boldsymbol{\lambda} = [x, y, z]^{\mathrm{T}}$, при этом $\boldsymbol{\lambda} \in \Lambda = \{\Lambda_R, \Lambda_\alpha, \Lambda_\beta\}$ (где $\Lambda_R = [R_{\min}, R_{\max}], \Lambda_\alpha = [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}], \Lambda_\beta = [\beta_{\min}, \beta_{\max}]$). Здесь R – наклонная дальность, α – азимут и β – угол места, α отсчитывается от оси OX, а β – от плоскости XOY. Каждой Π_m ставятся в соответствие два измерительных канала: ИК_m^α – азимутальный, ИК_m^β – угломестный. Данные каналы производят измерения азимута α_m и угла места β_m:

$$\tilde{\alpha}_m = \alpha_m + \Delta\alpha_m, \qquad \tilde{\beta}_m = \beta_m + \Delta\beta_m,$$

где $\Delta\alpha_m$ и $\Delta\beta_m$ – ошибки измерений, для которых $|\Delta\alpha_m| > \varepsilon_\alpha, |\Delta\beta_m| > \varepsilon_\beta$ (где $\varepsilon_\alpha > 0$ и $\varepsilon_\beta > 0$ – заданные константы). Полагается, что число каналов, не содержащих АОИ, должно быть не менее

$$\varsigma_{\alpha\beta} = \varsigma_\alpha^s + \varsigma_\beta^s,\ s = \overline{1, S},\ \varsigma_\alpha^s, \varsigma_\beta^s \in \{1, 2, ..., M\},\ \ M + 1 \le \varsigma_{\alpha\beta} \le 2M,$$

где $\varsigma_\alpha^s, \varsigma_\beta^s$ – составляющие числа $\varsigma_{\alpha\beta}$ для s–го варианта представления, обеспечивающего наблюдаемость задачи (S – общее число таких вариантов).

Для рассматриваемой ТСПЛ строится множество наблюдаемых измерительных структур $\{\text{НИС}_{[1]}, \text{НИС}_{[2]}, ..., \text{НИС}_{[\bar{N}]}\}$ (под $\text{НИС}_{[n]}$, где $n \in \{1, 2, ..., \bar{N}\}$, понимается произвольный набор измерительных каналов, при этом $\text{НИС}_{[n]}$ и $\text{НИС}_{[m]}$ не совпадают, если $n \ne m$, где $n, m \in \{1, 2, ..., N\}$,). Для этих структур задача определения местоположения цели (без учёта ошибок измерений) имеет единственное решение, при этом полагается, что $\text{НИС}_{[k]}$ и $\text{НИС}_{[l]}$ (где $k, l \in \{1, 2, ..., \bar{N}\},\ k \ne l$) не должны совпадать. Для $\text{НИС}_{[n]}$ формируется частная оценка (далее называемая отметкой) местоположения цели $\overset{*}{\boldsymbol{\lambda}}_{[n]} = \left[\overset{*}{x}_{[n]}, \overset{*}{y}_{[n]}, \overset{*}{z}_{[n]}\right]^{\mathrm{T}}$, например, на базе одного из известных методов решения задачи триангуляции, рассмотренных в работе [11]. Полагается, что все сформированные отметки удовлетворяют условию $\overset{*}{\boldsymbol{\lambda}}_{[n]} \in \Lambda$.

Для фиксированной НИС$_{[n]}$ и соответствующей ей отметки $\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}$ по отношению ко всем $\Pi_m\left(m=\overline{1,M}\right)$ строятся вторичные пеленги $\alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}\right)$ и $\beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}\right)$, для которых проверяется выполнение условий (отдельно по азимуту и углу места)

$$\left|\alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}\right)-\tilde{\alpha}_m\right|<\varepsilon_\alpha, \qquad \left|\beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}\right)-\tilde{\beta}_m\right|<\varepsilon_\beta,\ m=\overline{1,M}. \qquad (1)$$

Набор невязок (1) для первичных $\tilde{\alpha}_m, \tilde{\beta}_m$ и вторичных $\alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}\right), \beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}\right)$ пеленгов является мерой достоверности НИС$_{[n]}$ с учетом условия $M+1\le\varsigma_{\alpha\beta}\le 2M$. Если для всех сформированных вторичных пеленгов $\alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}\right)$ и $\beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}\right)$ (их суммарное количество по азимуту и углу места равно $2M$) выполняется менее M условий (1) (суммарное по азимуту и углу места), то рассматриваемая НИС$_{[n]}$ отсеивается. Оставшиеся после отсеивания (селекции) НИС называются рабочими измерительными структурами (РИС$_{[n]}$, где $n\in\{1,2,...,N\}$, $N\le\bar{N}$). Таким РИС$_{[n]}$ соответствуют отметки $\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}=\left[x^*_{[n]}, y^*_{[n]}, z^*_{[n]}\right]^{\mathrm{T}}$, для которых выполняется более чем M условий (1) (суммарное по азимутам и углам места всех приемных позиций ТСПЛ).

На множестве сформированных частных отметок $\boldsymbol{\lambda}^*_{[n]}$ ($n=\overline{1,N}$) осуществляется операция кластеризации с использованием заданного числа Q кластеров. Алгоритм кластеризации устанавливает отображение $f:\{1,2,...,N\}\to\{1,2,...,Q\}$, которое номерам n, сформированным ранее РИС$_{[n]}$, ставит в соответствие метку (номер кластера) $q\in\{1,2,...,Q\}$. В результате этого, семейство номеров $\{1,2,...,N\}$ разбивается на Q непересекающихся множеств–кластеров $\{\mathbb{K}_1,\mathbb{K}_2,...,\mathbb{K}_Q\}$, где $\mathbb{K}_q=\left\{q_1,q_2,...,q_{L(q)}\right\}$, $q_l\in\{1,2,...,N\}$, $\overline{l=1,L(q)}$,

$L(q)$ – количество элементов в кластере $\mathbb{K}_q$, $\mathbb{K}_q \neq \varnothing \quad \forall q = \overline{1,Q}$. При этом

$$\{1,2,...,N\} = \mathbb{K}_1 \bigcup \mathbb{K}_2 \bigcup \ldots \bigcup \mathbb{K}_Q,$$

где $\mathbb{K}_k \bigcap \mathbb{K}_r = \varnothing$, $\quad k \neq r \ \ \forall k, r \in \{1,2,...,Q\}$.

Для кластеризации применяется иерархический агломеративный алгоритм с евклидовой нормой ($\|\cdot\|_2$) [16-18]. Каждой метке $q_l \in \overline{1,L(q)}$ кластера $\mathbb{K}_q$ в пространстве соответствует некоторая отметка местоположения цели $\boldsymbol{\lambda}^*(q_l) = \left[x^*(q_l), y^*(q_l), z^*(q_l)\right]^{\mathrm{T}}$, поэтому кластер $\mathbb{K}_q$ можно отождествлять либо с множеством меток q_l, либо с множеством отметок $\boldsymbol{\lambda}^*(q_l)$. Кластер $\mathbb{K}_q$ $(q \in \{1,2,...,Q\})$ характеризуется параметрами: $L(q)$ – мощностью, $g(q) = D(q)/L(q)$ – разреженностью (где $D(q) = \max\limits_{l,m}\left\|\boldsymbol{\lambda}^*_{[q_l]} - \boldsymbol{\lambda}^*_{[q_m]}\right\|_2$ – диаметр кластера, $l,m = \overline{1,L(q)}$, $\quad q_l, q_m \in \mathbb{K}_q$), центром $-\boldsymbol{\lambda}^*(q) = \left[x^*(q), y^*(q), z^*(q)\right]^{\mathrm{T}}$, где $x^*(q) = \sum\limits_{l=1}^{L(q)} x^*(q_l)L^{-1}(q)$, $y^*(q) = \sum\limits_{l=1}^{L(q)} y^*(q_l)L^{-1}(q)$, $z^*(q) = \sum\limits_{l=1}^{L(q)} z^*(q_l)L^{-1}(q)$.

Кластер $\mathbb{K}_q$ по своей топологической структуре может быть сосредоточенным или распределенным, однородным или неоднородным, иметь или не иметь «близких соседей-кластеров». Для учета этих особенностей для каждого кластера $\mathbb{K}_q$ формируется множество $\boldsymbol{\Omega}_q = \left\{q_{\boldsymbol{\Omega}l}, l = \overline{1, L\left(\boldsymbol{\Omega}_q\right)}\right\}$ (называемое далее ядром кластера $\mathbb{K}_q$), где $L\left(\boldsymbol{\Omega}_q\right)$ – количество элементов ядра, $q_{\boldsymbol{\Omega}l} \in \{1,2,...,N\}$). Ядро объединяет в себе те отметки из множества $\left\{\boldsymbol{\lambda}^*_{[1]}, \boldsymbol{\lambda}^*_{[2]}, ..., \boldsymbol{\lambda}^*_{[N]}\right\}$, которые наиболее близки к центру $\boldsymbol{\lambda}^*(q)$ кластера $\mathbb{K}_q$ (следует отметить, что в ядро могут войти также отметки, не принадлежащие $\mathbb{K}_q$). При этом используется следующий критерий близости отметок

$$\left|\alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l})\right) - \alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*(q)\right)\right| < \varepsilon_\alpha, \quad \left|\beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l})\right) - \beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*(q)\right)\right| < \varepsilon_\beta, \ m = \overline{1,M}, \qquad (2)$$

где $\alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*(q)\right)$ и $\beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*(q)\right)$ – вторичные пеленги отметки $\boldsymbol{\lambda}^*(q)$ по отношению к приемной позиции Π_m, $\alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l})\right)$ и $\beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l})\right)$ – вторичные пеленги отметки $\boldsymbol{\lambda}^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l})=\left[x^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l}),y^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l}),z^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l})\right]^{\mathrm{T}}$, соответствующие $\text{РИС}_{[q_{\boldsymbol{\Omega}l}]}$, по отношению к Π_m.

Основными характеристиками ядра $\boldsymbol{\Omega}_q$ являются: мощность $L\left(\boldsymbol{\Omega}_q\right)\geq 1$, его разреженность $g\left(\boldsymbol{\Omega}_q\right)$ и центр $\boldsymbol{\lambda}^*(q_{\boldsymbol{\Omega}})=\left[x^*(q_{\boldsymbol{\Omega}}),y^*(q_{\boldsymbol{\Omega}}),z^*(q_{\boldsymbol{\Omega}})\right]$, где

$$x^*(q_{\boldsymbol{\Omega}})=\sum_{l=1}^{L(\boldsymbol{\Omega}_q)} x^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l})L^{-1}\left(\boldsymbol{\Omega}_q\right),\ y^*(q_{\boldsymbol{\Omega}})=\sum_{l=1}^{L(\boldsymbol{\Omega}_q)} y^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l})L^{-1}\left(\boldsymbol{\Omega}_q\right),$$

$$z^*(q_{\boldsymbol{\Omega}})=\sum_{l=1}^{L(\boldsymbol{\Omega}_q)} z^*(q_{\boldsymbol{\Omega}l})L^{-1}\left(\boldsymbol{\Omega}_q\right).$$

Каждому ядру $\boldsymbol{\Omega}_q$ ставится в соответствие семейство измерительных каналов $\mathbf{ИК}_{\boldsymbol{\Omega}q}=\left\{\mathbf{ИК}^{\alpha}_{\boldsymbol{\Omega}q},\mathbf{ИК}^{\beta}_{\boldsymbol{\Omega}q}\right\}$, где $\mathbf{ИК}^{\alpha}_{\boldsymbol{\Omega}q}=\left\{\text{ИК}^{\alpha}_{\boldsymbol{\Omega}qi},i=\overline{1,M^{\alpha}_{\boldsymbol{\Omega}q}}\right\}$ и $\mathbf{ИК}^{\beta}_{q}=\left\{\text{ИК}^{\beta}_{\boldsymbol{\Omega}qi},i=\overline{1,M^{\beta}_{\boldsymbol{\Omega}q}}\right\}$ – множества азимутальных и угломестных каналов (здесь $\text{ИК}^{\alpha}_{\boldsymbol{\Omega}qi}\in\left\{\text{ИК}^{\alpha}_1,\text{ИК}^{\alpha}_2,...,\text{ИК}^{\alpha}_M\right\}$ и $\text{ИК}^{\beta}_{\boldsymbol{\Omega}qi}\in\left\{\text{ИК}^{\beta}_1,\text{ИК}^{\beta}_2,...,\text{ИК}^{\beta}_M\right\}$, $M^{\alpha}_{\boldsymbol{\Omega}q}\leq M$ и $M^{\beta}_{\boldsymbol{\Omega}q}\leq M$), использованных при построении ядра $\boldsymbol{\Omega}_q$, при этом $M^{\alpha}_{\boldsymbol{\Omega}q}+M^{\beta}_{\boldsymbol{\Omega}q}\leq 2M$. Для каждого ядра $\boldsymbol{\Omega}_q$ находятся множества условно достоверных $\left(\mathbf{ИК}^{0}_{\boldsymbol{\Omega}q}=\left\{\mathbf{ИК}^{0\alpha}_{\boldsymbol{\Omega}q},\mathbf{ИК}^{0\beta}_{\boldsymbol{\Omega}q}\right\}\subseteq\mathbf{ИК}\right)$ и условно недостоверных $\left(\mathbf{ИК}^{1}_{\boldsymbol{\Omega}q}=\left\{\mathbf{ИК}^{1\alpha}_{\boldsymbol{\Omega}q},\mathbf{ИК}^{1\beta}_{\boldsymbol{\Omega}q}\right\}\subseteq\mathbf{ИК}\right)$ измерительных каналов, где $\mathbf{ИК}$ – множество всех азимутальных и угломестных каналов ТСПЛ, $\mathbf{ИК}^{0}_{\boldsymbol{\Omega}q}\cap\mathbf{ИК}^{1}_{\boldsymbol{\Omega}q}=\varnothing$, $\mathbf{ИК}^{0}_{\boldsymbol{\Omega}q}\cup\mathbf{ИК}^{1}_{\boldsymbol{\Omega}q}=\mathbf{ИК}$, $\left|\mathbf{ИК}^{\mathbf{0}}_{\boldsymbol{\Omega}q}\right|+\left|\mathbf{ИК}^{1}_{\boldsymbol{\Omega}q}\right|=\left|\mathbf{ИК}\right|=2M$; $\left|\mathbf{ИК}^{\mathbf{0}}_{\boldsymbol{\Omega}q}\right|$, $\left|\mathbf{ИК}^{1}_{\boldsymbol{\Omega}q}\right|$, $\left|\mathbf{ИК}\right|$ – мощности (количество элементов) множеств $\mathbf{ИК}^{\mathbf{0}}_{\boldsymbol{\Omega}q}$, $\mathbf{ИК}^{1}_{\boldsymbol{\Omega}q}$ и $\mathbf{ИК}$

соответственно. Для построения множеств $\mathbf{ИК}_{\mathbf{\Omega}q}^{0\alpha}$ и $\mathbf{ИК}_{\mathbf{\Omega}q}^{0\beta}$ выполняется проверка условий

$$\left|\tilde{\alpha}_m - \alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*\left(q_{\mathbf{\Omega}}\right)\right)\right| \le \varepsilon_\alpha, \qquad \left|\tilde{\beta}_m - \beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*\left(q_{\mathbf{\Omega}}\right)\right)\right| \le \varepsilon_\beta, \quad m = \overline{1, M}, \tag{3}$$

где $\alpha_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*\left(q_{\mathbf{\Omega}}\right)\right)$ и $\beta_m\left(\boldsymbol{\lambda}^*\left(q_{\mathbf{\Omega}}\right)\right)$– вторичные пеленги центра $\boldsymbol{\lambda}^*\left(q_{\mathbf{\Omega}}\right)$ ядра $\mathbf{\Omega}_q$. Соответственно для элементов множеств $\mathbf{ИК}_{\mathbf{\Omega}q}^{1\alpha}$ и $\mathbf{ИК}_{\mathbf{\Omega}q}^{1\beta}$ условия (3) не выполняются.

2. Обнаружение недостоверных каналов и формирование результирующей оценки при заданном числе кластеров

В известном методе [2] число Q используемых кластеров заранее задано. Для выбора наилучшего ядра $\mathbf{\Omega}^{\text{opt}}$, соответствующего номеру $q_{\mathbf{\Omega}}^{\text{opt}} \in \{1, 2, ..., Q\}$, используется алгоритм

$$q_{\mathbf{\Omega}}^{\text{opt}} = \arg\max_q \left|\mathbf{ИК}_{\mathbf{\Omega}q}^{\mathbf{0}}\right|, \tag{4}$$

который отдает предпочтение ядру, которому отвечает множество условно достоверных каналов $\mathbf{ИК}_{\mathbf{\Omega}q}^{\mathbf{0}}$ с максимальным числом элементов. Если решение (4) не единственное, то согласно принципу ранжирования из всех кластеров, удовлетворяющих (4), предпочтение отдается более плотному ядру $\mathbf{\Omega}^{\text{opt}}$ (т.е. с минимальной разреженностью)

$$g\left(\mathbf{\Omega}^{\text{opt}}\right) = \min_q g\left(\mathbf{\Omega}_q\right). \tag{5}$$

Данный алгоритм соответствует случаю, когда каждому ядру $\mathbf{\Omega}_q$ соответствует непустое множество $\mathbf{ИК}_{\mathbf{\Omega}q}^{1}$, т.е. для любого $q \in \overline{1, Q}$ имеется хотя бы один условно недостоверный канал. Далее, когда найдено оптимальное ядро $\mathbf{\Omega}^{\text{opt}}$, на базе первичных измерений условно достоверных каналов, входящих в множество $\mathbf{ИК}_{\mathbf{\Omega}q}^{0}$, проводится вторая прогонка метода [2] и строится (одним из известных методов, например, методом максимального правдоподобия [11]) результирующая отметка местоположения цели. Если существует семейство ядер $\mathbf{\Omega}_q^0 = \left\{\mathbf{\Omega}_{ql}^0, l = \overline{1, L^0\left(\mathbf{\Omega}_q\right)}\right\}$ (где $\mathbf{\Omega}_{ql}^0 \in \left\{\mathbf{\Omega}_1, \mathbf{\Omega}_2, ..., \mathbf{\Omega}_Q\right\}$, $L^0\left(\mathbf{\Omega}_q\right) \le L\left(\mathbf{\Omega}_q\right)$), у которых отсутствуют недостоверные измерительные каналы, то оптимальное ядро $\mathbf{\Omega}^{\text{opt}}$ выбирается непосредственно из этого семейства, с учетом указанного выше принципа ранжирования. Поскольку для ядра $\mathbf{\Omega}^{\text{opt}}$ характерно отсутствие недостоверных каналов, то его центр $\boldsymbol{\lambda}^*\left(q_{\mathbf{\Omega}}^{\text{opt}}\right)$ принимается за результирующую отметку и вторая прогонка метода [2] не нужна.

Экспериментально было установлено, что можно повысить точность оценивания, если в отличие от метода [2] использовать следующий алгоритм выбора оптимального кластера

$$q_{\mathbf{\Omega}}^{\text{opt}} = \arg\max_q \left[\left|\mathbf{ИК}_{\mathbf{q}}^{\mathbf{0}}\right| / |\mathbf{ИК}| + L\left(\mathbf{\Omega}_q\right) / N\right] / 2, \tag{6}$$

в котором одновременно учитывается число условно достоверных каналов и мощность кластера (в относительных единицах). Если решение (6) не единственное, то далее, согласно принципу ранжирования, предпочтение отдается более плотному ядру.

Также было установлено, что еще более эффективным (с точки зрения точности оценивания), но и более затратным (в вычислительном плане), является другой алгоритм выбора оптимального кластера

$$q^{\text{opt}} = \arg\max_q \left[\left(\sum_{l=1}^{L(q)} \left|\mathbf{ИК}_{\mathbf{q}l}^{\mathbf{0}}\right| / |\mathbf{ИК}| + L / N\right)\right] / 2, \tag{7}$$

который не оперирует с ядрами $\mathbf{\Omega}_q$, но требует нахождения всех условно достоверных каналов $\mathbf{ИК}_{\mathbf{q}l}^{\mathbf{0}}$ для каждой отметки $\boldsymbol{\lambda}^*\left(q_l\right)$, попавшей в кластер $\mathbb{K}_q$ (напомним, что в алгоритме (6) мы оперировали с каналами, относящимися только к центру $\boldsymbol{\lambda}^*\left(q_{\mathbf{\Omega}}\right)$ ядра $\mathbf{\Omega}_q$).

3. Обнаружение недостоверных каналов и формирование результирующей оценки при адаптивном выборе числа кластеров

Если в методе [2] число кластеров Q считалось заранее заданным, то теперь рассматривается процедура автоматического расчета количества (Q) кластеров $\mathbb{K}_q$, необходимых для разбиения частных отметок цели. Пусть $Q_{k+1} = Q_k + 1$ переменный параметр (означает количество кластеров $\mathbb{K}_{qk}$ разбиения отметок цели на k - ом шаге адаптации, где $k \in \{0,1,...\}$), для которого задается начальное значение $Q_0 \geq 2$ (выбор Q_0 может осуществляться с использованием опытного оператора). Далее для текущего Q_k последовательно, начиная с Q_0, вычисляются величины $L_k(q)$, $\sum_{l=1}^{L(q)} \left|\mathbf{ИК}_{\mathbf{q}lk}^{\mathbf{0}}\right| / L_k(q)$ и V_k, где

$$V_k = \sum_{q=1}^{Q_k} \left[\sum_{i=1}^{L_k(q)} \sum_{j=1}^{L_k(q)} \left| \boldsymbol{\lambda}^*(q_{ik}) - \boldsymbol{\lambda}^*(q_{jk}) \right| \right]. \tag{8}$$

Здесь под V_k (применительно к k-му шагу разбиения) понимается сумма внутри-кластерных вариаций $\left|\boldsymbol{\lambda}^*(q_{ik}) - \boldsymbol{\lambda}^*(q_{jk})\right|$, где $\boldsymbol{\lambda}^*(q_{ik})$ и $\boldsymbol{\lambda}^*(q_{jk})$– соответственно i-я и j-я отметки кластера $\mathbb{K}_{qk}$, $L_k(q)$ – количество элементов в данном кластере. Несложно показать, что V_k есть убывающая функция от аргумента k, при этом $V_k = 0$ при $k = N$ (т.е. когда каждый кластер состоит из одной отметки). Для определения оптимального числа кластеров разбиения Q^{opt} увеличиваем значение параметра k и последовательно вычисляем V_k до тех пор, пока не будет выполнено условие $V_k - V_{k+1} < \varepsilon_V$, где $\varepsilon_V > 0$ – порог. Затем для найденных $k = k^{\text{opt}}$ и $Q = Q^{\text{opt}}$, по аналогии с (7), реализуется алгоритм обнаружения оптимального кластера

$$q^{\text{opt}} = \max_q \left[\left(\sum_{l=1}^{L^{\text{opt}}(q)} \left| \mathbf{ИК}_{\mathbf{q}l}^{\mathbf{0}\text{opt}} \right| / |\mathbf{ИК}| + L^{\text{opt}}(q) / N \right) \right] / 2. \tag{9}$$

Далее, когда найден оптимальный кластер $\mathbb{K}_q^{\text{opt}}$, соответствующий номеру $q^{\text{opt}} \in \{1, 2, ..., Q\}$, на базе первичных измерений условно достоверных каналов, входящих в множество $\mathbf{ИК}_{\mathbf{q}l}^{\mathbf{0}\text{opt}}$, проводим вторую прогонку модифицированного кластерно-вариационного метода (с учетом (4)-(9)) и строим (одним из известных статистических методов, например, методом максимального правдоподобия [11]) результирующую оценку.

Рассмотренный способ кластеризации связан с заданием порога ε_V. Более совершенным (но и более затратным) является метод кластерных силуэтов [19], в котором данная информация не требуется, при этом обеспечивается автоматический выбор числа необходимых кластеров с наилучшей визуализацией результатов кластеризации.

4. Двухэтапный алгоритм обнаружения недостоверных каналов и формирования результирующей оценки

С целью увеличения оперативности оценивания можно использовать двухэтапный алгоритм. На первом этапе приведенные выше результаты реализуются на базе РИС, содержащих только азимутальные каналы (что позволяет существенно сократить общее число РИС по сравнению с методом [2]). Это дает возможность обнаружить условно достоверные азимутальные каналы и на их основе построить результирующую оценку двух координат (x и y) местоположения цели. Далее находятся условно достоверные угломестные каналы (с учетом тех РИС, которые строятся на базе всех угломестных каналов и найденных условно достоверных азимутальных каналов). После того как обнаружены достоверные угломестные каналы, вычисляется оценка третьей координаты (z).

5. Иллюстративный пример

Для сравнительного анализа рассмотренных алгоритмов оценивания рассмотрим ТСПЛ со следующей геометрией: $M = 5$, $\xi_m = [x_m, y_m, z_m]^{\text{T}} = [10^4 \cos(2\pi m / M), 10^4 \sin(2\pi m / M), 0]$, $m = \overline{1,4}$.

Местоположение цели и позиций будем задавать в метрах, азимут, угол места и ошибки пеленгования в радианах,

$$\boldsymbol{\lambda} = [x, y, z]^{\mathrm{T}} = \left[5 \cdot 10^4 \cos(2\pi k / K), 5 \cdot 10^4 \sin(2\pi k / K), 3 \cdot 10^3\right]^{\mathrm{T}},\ k = \overline{1,180}.$$

Для каждого фиксированного k принималось, что в достоверных измерительных каналах флуктуационные ошибки измерений распределены по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и корреляционной матрицей $\mathbf{K}_{\xi m} = \mathrm{diag}\left[\sigma_{\alpha m}^2, \sigma_{\beta m}^2\right] = \mathrm{diag}\left[\sigma_{\alpha}^2, \sigma_{\beta}^2\right]$, где $\sigma_\alpha = \pi / 360$ и $\sigma_\beta = \pi / 360$, ошибки формировались с помощью датчика случайных чисел (ошибки разных позиций независимы). Номера недостоверных каналов (не более, чем половина всех азимутальных и не более, чем половина всех угломестных каналов), содержащих АОИ, выбирались случайным образом (напомним, что в [2] при сравнении различных алгоритмов решения задачи триангуляции такой случайный выбор не исследовался). В этих каналах формировалась результирующая ошибка измерений, принадлежащая интервалам возможных значений $(3\sigma_\alpha, \pi / 6)$ для азимутального канала и $(3\sigma_\beta, \pi / 6)$ – для угломестного. Процедура оценивания проводилась для каждого фиксированного k с последующим усреднением по ста экспериментам. Сравнивались четыре алгоритма: A_1– на основе (6) при фиксированном значении $Q = 7$, A_2– на основе (8) с адаптивным выбором оптимального числа кластеров Q^{opt} (когда $Q_0 = 2$), A_3– на основе двухэтапного декомпозиционного подхода, A_4– на основе кластерно-вариационного метода [2], оперирующего непосредственно с линиями положения (линиями визирования) цели. Для сравниваемых алгоритмов использовались две числовые характеристики: $S(\mathrm{A}_i)$– интегральная характеристика точности (выражается в метрах), $\delta T(\mathrm{A}_i)$– характеристика вычислительной оперативности (выражается в процентах). При этом для k-го положения цели и алгоритма A_i:

$$S(\mathrm{A}_i)=\sum_{k=1}^{180} S_k(\mathrm{A}_i)=\sum_{k=1}^{180} \pi\Delta_k(\mathrm{A}_i)/90,$$

где $\Delta_k(\mathrm{A}_i)=\left\|\bar{\boldsymbol{\lambda}}_k^*(\mathrm{A}_i)-\boldsymbol{\lambda}_k\right\|_2$ – частная невязка, $\boldsymbol{\lambda}_k$ – вектор истинного положения цели, $\boldsymbol{\lambda}_{kp}^*(\mathrm{A}_i)$ и $\bar{\boldsymbol{\lambda}}_k^*(\mathrm{A}_i)=\sum_{p=1}^{100}\boldsymbol{\lambda}_{kp}^*(\mathrm{A}_i)/100$ – соответственно единичная и усредненная оценки вектора $\boldsymbol{\lambda}_k$.

Для характеристики $\delta T(\mathrm{A}_i)$ имеем $\delta T(\mathrm{A}_i)=100T(\mathrm{A}_i)T^{-1}(\mathrm{A}_2)[\%]$, принимая во внимание, что алгоритм A_2 требует больше временных затрат, чем другие алгоритмы.

В табл. 1 сведены результаты моделирования для случая, когда в каналах ТСПЛ присутствуют только флуктуационные ошибки (т.е. АОИ отсутствуют). Видим, что в нормальных условиях функционирования ТСПЛ двухэтапный алгоритм A_3 обеспечивает существенный выигрыш в точности по сравнению с известным кластерно-вариационным методом [2] и уступает в оперативности только алгоритму A_4.

Таблица 1

Алгоритмы (A_i)	1	2	3	4
$S(\mathrm{A}_i)$, м	1552	2048	911	1328
$\delta T(\mathrm{A}_i)$, %	94	100	9	1.5

Результаты моделирования с учетом АОИ в каналах пеленгации сведены в табл. 2.

Таблица 2

Алгоритмы (A_i)	1	2	3	4
$S(\mathrm{A}_i)$, м	7830	4329	5637	12163
$\delta T(\mathrm{A}_i)$, %	90	100	14	2

Видим, что в аномальных условиях функционирования ТСПЛ алгоритм оценивания с адаптивным выбором числа кластеров и модифицированным критерием обнаружения существенно лучше (в плане точности) по сравнению с алгоритмами A_1 и A_4. В плане оперативности он самый трудозатратный. Из табл. 2 также видим, что алгоритм A_3 несколько уступает по точности оптимальному алгоритму A_2, зато требует существенно меньше временных затрат. Оптимальным значением для числа используемых кластеров является $Q^{\mathrm{opt}} = 7$.

Заключение

Предложенная модификация известного кластерно-вариационного метода решения задачи триангуляции [1,2] более эффективна при обнаружении достоверных и недостоверных измерительных каналов, а также построении устойчивой к АОИ результирующей оценки параметров движения излучающей цели. Данная модификация как самостоятельно, так и в совокупности с традиционными подходами, может быть эффективно использована как инструмент интеллектуально-аналитического совершенствования существующих и разработки перспективных ТСПЛ нового поколения.

Литература

1. Булычев Ю.Г., Головской В.А. Обработка измерений угломерных систем в условиях априорной неопределенности в регуляризированной постановке. *Радиотехника и электроника*. 2010. Т.55. №1. С 71–77.
2. Булычев Ю.Г., Чепель Е.Н. Квазиоптимальный метод решения задачи триангуляции в условиях априорной неопределенности. *Автометрия*. 2017. Т.53. №6. С.83–91.
3. Сайбель А.Г. *Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения*. Москва, Оборонгиз. 1958. 56 с.
4. Кукес И.С., Старик М.Е. *Основы радиопеленгации*. Москва, Сов. Радио. 1964. 640 с.

5. *Теоретические основы радиолокации*. Под ред. Ширмана Я.Д. Москва, Сов. Радио. 1970. 560 с.
6. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. *Многопозиционные радиотехнические системы*. Москва, Радио и связь, 1986. 264 с.
7. Черняк В.С. *Многопозиционная радиолокация*. Москва, Радио и связь. 1993. 416 с.
8. Singhal S.C., Stansel L.E. A statistical model for optikal instrument location. *Opt. Eng.* 1980. Vol.19. No.3. P.376.
9. Wax M. Position location from sensors with position uncertainly. *IEEE Trans*. 1983. Vol.19. No.5. P.658.
10. Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Ивакина С.С., Насенков И.Г. Пассивная локация группы движущихся целей одним стационарным пеленгатором с учетом априорной информации. *Автоматика и телемеханика*. 2017. №1. С.152–166.
11. Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Ивакина С.С. и др. Обоснование методов оптимального оценивания параметров движения цели в триангуляционной измерительной системе. *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2015. №4. С.94–110.
12. Lin X., Kirubarajan T., Bar-Shalom Y., Maskell S. Comparison of EKF, pseudomeasurement and particle filters for a bearing-only target tracking problem. *Proc. SPIE*. 2002. 4728. P.240–250.
13. Aidala V.J., Nardone S.C. Biased estimation properties of the pseudolinear tracking filte. *IEEE Trans.Aerospase Electron. Syst*. 1982.Vol.18. No.4. P.432-441.
14. Amelin K.S., Miller A.B. An Algorithm for refinement of the position of a light UAV on the basis of Kalman filtering of bearing measurements. Journ. *Commun.Technol. and Electron*. 2014. Vol.59. No.6. P.622–631.
15. Miller A.B. Development of the motion control on the basis of Kalman filtering of bearing-only measurements. *Automation and Remote Control*. 2015. Vol.76. No.6. P.1018–1035.

16. Мандель И.Д. *Кластерный анализ*. Москва, Финансы и статистика. 1988. 176 с.
17. Уиллиамс У.Т., Ланс Д.Н. Методы иерархической классификации. В сборнике: *Статистические методы для ЭВМ*. Под ред. Малютова М.Б. Москва, Наука. 1986. 464 с.
18. Lance G.N., Willams W.T. A general theory of classification sorting strategies. 1. Hierarchical systems. *Comp. Journ*. 1967. Vol.9. No.4. P.373–380.
19. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Кластерные силуэты. Сборник трудов XX Международной научно-практической конференции “Системный анализ в проектировании и управлении”. Санкт-Петербург, 29 июня-1июля 2016. С.314–321.

Для цитирования:
Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Чепель Е.Н. Модифицированный кластерно-вариационный метод триангуляционного оценивания в условиях неопределенности. Журнал *радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №4. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.8