DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.2

УДК: 621.396.96

Исследование устойчивости кластерно-вариационного метода координатометрии к условиям неопределенности

Д.Ю. Голубев

**Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент»,
Россия, Ростов-на-Дону**

Статья поступила в редакцию 24 июля 2026 г.

Аннотация. Проведено исследование устойчивости кластерно-вариационного метода координатометрии источников радиоизлучения, предназначенного для применения в многопозиционных угломерных комплексах в условиях существенной априорной неопределенности. Рассмотрено влияние аномальных измерений, пропусков данных, асинхронности наблюдений и неблагоприятной геометрии расположения пеленгаторов на точность и надежность координатометрии. Введены количественные показатели устойчивости, характеризующие вероятность корректной координатометрии источника, среднеквадратическую ошибку оценивания и предельные допустимые уровни деградации измерительной информации. По результатам численного моделирования получены зависимости точности от доли грубых ошибок и числа доступных каналов. Показано, что кластерно-вариационный подход обеспечивает работоспособность в условиях, при которых классические статистические методы становятся неустойчивыми.

Ключевые слова: источник радиоизлучения, угломерный комплекс, координатометрия, робастность, кластеризация, аномальные измерения, грубые ошибки, асинхронность, устойчивость.

Автор для переписки: Голубев Дмитрий Юрьевич, golubev360@inbox.ru

Введение

Многопозиционные угломерные комплексы, основанные на использовании пространственно разнесенных пеленгаторов, широко применяются при решении задач координатометрии источников радиоизлучения (ИРИ). Точность функционирования таких систем существенно зависит от качества входной измерительной информации, геометрии расположения пеленгаторов и степени априорной неопределенности условий наблюдения [1].

На практике обработка пеленгационной информации осложняется рядом неблагоприятных факторов, к числу которых относятся наличие грубых ошибок измерений, пропуски данных, разноточность каналов, а также асинхронность поступления измерений. В указанных условиях классические статистические методы, ориентированные на совместную обработку всех измерений в рамках единой модели, могут демонстрировать значительную деградацию точности и приводить к формированию ложных оценок положения источника [2].

Особенно остро проблема устойчивости проявляется в условиях радиоэлектронного противодействия, когда часть пеленгаторов может подвергаться преднамеренным помехам, либо в условиях сложной помеховой обстановки, когда естественные явления (рефракция, многолучевость) приводят к появлению аномальных ошибок. Классические методы, такие как метод максимального правдоподобия или метод наименьших квадратов, предполагают, что все измерения являются достоверными и подчиняются известному закону распределения. При нарушении этих предположений данные методы не только теряют точность, но и могут давать ложные оценки местоположения ИРИ.

Для преодоления указанных ограничений применяется кластерно-вариационный подход, основанный на принципах размножения частных

решений, их кластеризации и последующего выбора результирующей оценки по совокупности согласованных измерений [3]. В отличие от классических методов, данный подход не требует априорного знания законов распределения ошибок и номеров аномальных каналов. Вместо этого он использует тот факт, что даже при значительном уровне аномальных искажений большинство частных угломерных решений, построенных по различным комбинациям пеленгаторов, будут группироваться вблизи истинного положения ИРИ. Выделяя такой кластер, можно получить устойчивую оценку его координат. Такой подход обладает робастными свойствами и позволяет снизить влияние аномальных наблюдений [4].

Целью настоящей работы является анализ устойчивости кластерно-вариационного метода координатометрии ИРИ в условиях аномальных и пропадающих измерений, а также получение количественных зависимостей, характеризующих границы его работоспособности. Основное внимание уделяется определению предельно допустимых уровней деградации измерительной информации (доли аномальных измерений и доли их пропусков), при которых метод сохраняет приемлемую точность и вероятность корректной координатометрии.

1. Постановка задачи и модель наблюдений

Рассматривается многопозиционный угломерный комплекс, состоящий из M пространственно разнесенных пеленгаторов, координаты которых в декартовой системе координат XYZ заданы векторами $\mathbf{P}_m = [x_m, y_m, z_m]^{\mathrm{T}}$, $m = \overline{1,M}$. ИРИ характеризуется вектором координат $\lambda = [x, y, z]^{\mathrm{T}}$.

Каждый пеленгатор формирует угловые измерения направления на ИРИ, которые в общем случае включают азимут и угол места. Вектор измерений от m-го пеленгатора может быть представлен в виде $\mathbf{S}_m = [\alpha_m, \beta_m]^{\mathrm{T}}$.

Совокупность измерений от всех пеленгаторов объединяется в общий вектор наблюдений $\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1^{\mathrm{T}}, \mathbf{S}_2^{\mathrm{T}}, \ldots, \mathbf{S}_M^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$. Реальные измерения содержат ошибки и могут

быть представлены в виде: $\mathbf{H}=\mathbf{S}+\boldsymbol{\Delta}+\boldsymbol{\xi}$, где $\boldsymbol{\Delta}$ – вектор аномальных (грубых) ошибок измерений, $\boldsymbol{\xi}$ – вектор случайных шумов, моделируемых нормальным распределением с нулевым математическим ожиданием и заданной ковариационной матрицей **R**.

В условиях функционирования многопозиционного комплекса возможны следующие виды деградации измерительной информации: наличие грубых ошибок, приводящих к появлению аномальных пеленгов; пропуски измерений от отдельных пеленгаторов; разноточность измерений, обусловленная различными характеристиками каналов; асинхронность наблюдений, при которой измерения относятся к различным моментам времени [5].

Указанные факторы приводят к тому, что классическая задача совместного оценивания координат ИРИ на основе всех доступных измерений становится некорректной и может не иметь устойчивого решения. В частности, наличие аномальных измерений приводит к формированию ложных пересечений пеленгационных лучей и искажению результирующей оценки [6]. Например, если один из пяти пеленгаторов дает грубую ошибку в 10 градусов, то координатометрия с использованием всех пяти пеленгаторов даст оценку, смещенную на сотни метров или даже километров, тогда как при отбрасывании этого пеленгатора точность может восстановиться. Однако на практике номера аномальных каналов неизвестны, и их нужно обнаруживать.

В рамках кластерно-вариационного подхода задача координатометрии источника формулируется как задача обработки множества частных угломерных решений, формируемых по различным подмножествам измерений [2]. Каждое частное решение представляет собой оценку координат ИРИ: $\hat{\lambda}_k, k=1,2,....,K$, где K – общее число сформированных угломерных отметок.

Совокупность частных решений образует множество точек (отметок) в пространстве координат, структура которого зависит от степени согласованности измерений и наличия аномальных данных. Если аномальные измерения отсутствуют, все частные отметки будут группироваться в компактной области, вблизи истинного положения ИРИ. Если же в измерениях содержатся

отдельные грубые ошибки, то часть отметок (которые соответствуют аномальным каналам) окажется разбросанной по пространству, в то время как решения, построенные только по измерениям достоверных каналов, сохранят компактность. Задача координатометрии ИРИ в этом случае сводится к анализу структуры данного множества и выделению устойчивого кластера, соответствующего реальному положению ИРИ [7].

В дальнейшем устойчивость кластерно-вариационного метода оценивается на основе анализа характеристик сформированного множества частных решений при различных сценариях деградации измерительной информации.

Цель работы – количественно оценить устойчивость кластерно-вариационного метода координатометрии ИРИ при воздействии аномальных измерений, пропусков данных, асинхронности и неблагоприятной геометрии пеленгаторов, а также определить предельные уровни деградации измерительной информации, при которых метод сохраняет работоспособность.

2. Показатели устойчивости и модели деградации

Для количественной оценки устойчивости метода введем показатели, характеризующие точность оценивания координат ИРИ и надежность координатометрии при деградации измерительной информации.

Пусть истинное положение ИРИ задается вектором координат $\boldsymbol{\lambda}$, а результирующая оценка, формируемая кластерно-вариационным методом, равна $\hat{\boldsymbol{\lambda}}$. Ошибка оценивания определяется евклидовой нормой $\varepsilon = \left\| \hat{\boldsymbol{\lambda}} - \boldsymbol{\lambda} \right\|$. В качестве интегральной характеристики точности будем использовать среднеквадратическую ошибку (СКО): $\sigma_\varepsilon = \sqrt{M\left\{\varepsilon^2\right\}}$.

Поскольку метод ориентирован на обработку множества частных угломерных решений $\left\{\hat{\boldsymbol{\lambda}}_k\right\}_{k=1}^{K}$, где ключевым этапом является выделение кластера согласованных решений. Пусть результатом кластеризации является

разбиение множества отметок на L кластеров: $C_1, C_2, \ldots, C_L$. Для каждого кластера введем:

- мощность (число элементов): $n_\ell = |C_\ell|$;
- центр кластера: $\bar{\boldsymbol{\lambda}}_\ell$;
- внутрикластерный разброс (среднеквадратический радиус): r_ℓ.

В рамках настоящей работы считаем, что метод корректно идентифицирует ИРИ, если выполняется условие близости центроида выбранного кластера к истинным координатам: $\left\|\boldsymbol{\lambda}^* - \boldsymbol{\lambda}\right\| \le \varepsilon$. Порог ε выбирается исходя из требуемой точности координатометрии и геометрии угломерного комплекса. В настоящей работе принято, $\varepsilon = 2\sigma\omega$, где σ – среднеквадратическая ошибка пеленгования, ω – геометрический фактор [2].

Тогда вероятность корректной координатометрии оценивается по серии численных экспериментов как:

$$P = \frac{N_o}{N},$$

где N – общее число реализаций моделирования, N_0 – число реализаций, в которых условие корректной координатометрии выполнено.

Дополнительно введем показатель ложной координатометрии – вероятность выбора ложного кластера:

$$P_{\text{лк}} = 1 - P.$$

Для анализа работоспособности в условиях пропуска данных введем число доступных пеленгаторов $M_{\text{дп}} \le M$, а также долю пропусков:

$$q = 1 - \frac{M_{\text{дп}}}{M}.$$

Для условий с аномальными измерениями введем долю аномальных каналов:

$$p = \frac{M_{\text{гои}}}{M_{\text{дп}}},$$

где $M_{\text{гои}}$ – количество каналов, содержащих грубые ошибки измерений.

Модели деградации измерительной информации. Для анализа устойчивости метода необходимо формализовать основные факторы, приводящие к ухудшению качества входных измерений. Рассматриваются четыре типа деградации: наличие грубых (аномальных) ошибок измерений, пропуски данных от части пеленгаторов, разноточность каналов и асинхронность наблюдений.

Грубые ошибки измерений. Пусть среди $M_{\text{дп}}$ доступных пеленгаторов часть каналов содержит грубые ошибки. Предполагается, что ненулевые компоненты вектора $\mathbf{\Delta}$ возникают случайно и могут принимать произвольные значения в пределах $\|\mathbf{\Delta}_i\| \le \Delta_{\text{макс}}$, причем $\Delta_{\text{макс}} \gg \sigma$. Количество аномальных измерений равно $M_{\text{гои}}$, а относительная доля грубых ошибок определяется как:

$$P = \frac{M_{\text{гои}}}{M_{\text{дп}}}.$$

При $p \to 0$ условия близки к номинальным, при $p \to 0.5$ и выше классические методы координатометрии, как правило, теряют устойчивость.

Пропуски измерений. Пропуски данных обусловлены временной недоступностью канала, экранированием источника или сбоями передачи информации. Доля пропусков определяется как:

$$q = 1 - \frac{M_{\text{дп}}}{M}.$$

Уменьшение $M_{\text{дп}}$ приводит к сокращению числа комбинаций частных решений, росту геометрической неопределенности и увеличению разброса частных оценок.

Разноточность измерительных каналов. В реальных системах дисперсии угловых измерений некоторых пеленгаторов могут существенно различаться. Полагая ковариационную матрицу ошибок пеленгования диагональной, для характеристики степени разноточности используем коэффициент:

$$k = \frac{\max\limits_{m} \sigma_m}{\min\limits_{m} \sigma_m},$$

где $m = \overline{1, M}$.

При $k=1$ каналы равноточны, при $k >> 1$ наблюдается выраженная деградация части измерений.

Асинхронность измерений. При движении ИРИ и асинхронности измерений истинное положение источника для каждого канала определяется с учетом временного сдвига. Использование асинхронных измерений в классической координатометрии эквивалентно появлению дополнительной систематической ошибки, величина которой пропорциональна временному рассогласованию:

$$\Delta_t = \max_m |t_m - t_0| .$$

Задача исследования устойчивости заключается в анализе зависимостей точности и вероятности корректной координатометрии ИРИ от перечисленных параметров.

3. Методика численного эксперимента

Для количественной оценки устойчивости кластерно-вариационного метода проведено численное моделирование, имитирующее функционирование многопозиционного угломерного комплекса в условиях различной степени деградации измерительной информации.

Геометрия измерительной системы. Рассматривается угломерный комплекс, состоящий из M пеленгаторов. В базовом варианте используется равномерное размещение пеленгаторов по окружности радиуса R_0:

$$p_m = \begin{Bmatrix} R_0 \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right) \\ R_0 \sin\left(\frac{2\pi m}{M}\right) \\ 0 \end{Bmatrix},$$

где $m = \overline{1, M}$.

Такое размещение обеспечивает контролируемую геометрию и позволяет варьировать показатель ω в зависимости от положения ИРИ.

Генерация измерений. Для каждого пеленгатора формируются модельные угловые измерения с добавлением случайного шума и аномальных ошибок (для части каналов). Аномальные ошибки вводятся случайным образом для $M_{\text{гои}}$ каналов. Для них величина ошибки формируется с учетом равномерного закона распределения на интервале от $-\Delta_{\text{макс}}$ до $\Delta_{\text{макс}}$. Пропуски измерений моделируются случайным исключением части каналов из обработки. Разноточность задается индивидуальными дисперсиями. Для асинхронного режима моменты времени измерений выбираются со случайным сдвигом в пределах $\pm\Delta_t$.

Формирование частных решений и кластеризация. На базе доступных измерений формируется множество частных угломерных отметок по различным подмножествам измерительных каналов. Для каждого подмножества применяется стандартный оператор координатометрии. Полученные оценки подвергаются иерархической агломеративной кластеризации с метрикой «ближайшего соседа» (single linkage) [8]. Результирующая оценка определяется по кластеру с максимальной мощностью либо минимальным внутрикластерным разбросом. Для каждого набора параметров выполняется серия из N независимых экспериментов, после чего рассчитываются показатели σ_ε и P.

Сравниваемые алгоритмы. Для сопоставления эффективности анализируются: классическая координатометрия (совместная обработка всех измерений), робастная обработка с отсевом выбросов и кластерно-вариационный метод. Это позволяет оценить выигрыш в устойчивости, обеспечиваемый кластеризацией частных решений.

4. Результаты моделирования и анализ устойчивости

В настоящем разделе приведены результаты численного моделирования, направленного на исследование устойчивости кластерно-вариационного метода координатометрии ИРИ в условиях деградации измерительной информации. Анализ выполнялся по показателям среднеквадратической ошибки оценивания координат и вероятности корректной координатометрии.

Влияние аномальных измерений. На первом этапе исследовано влияние доли грубых ошибок p на характеристики координатометрии при фиксированном числе доступных пеленгаторов и номинальной геометрии системы. Результаты моделирования показывают, что при увеличении доли аномальных измерений наблюдается рост среднеквадратической ошибки для всех рассматриваемых алгоритмов.

Для классической координатометрии уже при $p \approx 0.1$ отмечается резкая деградация точности, сопровождающаяся формированием ложных решений. При дальнейшем увеличении p метод фактически теряет работоспособность. Робастные алгоритмы с отсевом выбросов демонстрируют более плавный рост ошибки, однако также оказываются чувствительными к увеличению числа аномальных каналов.

Кластерно-вариационный метод сохраняет устойчивость вплоть до существенно больших значений p. При $p \leq 0.3$ вероятность корректной координатометрии остается близкой к единице, а рост ошибки носит умеренный характер. Лишь при $p \geq 0.4$ наблюдается заметное снижение надежности, обусловленное разрушением структуры доминирующего кластера. Таким образом, кластерно-вариационный метод обеспечивает работоспособность при доле аномальных измерений до 40 %, тогда как классические методы перестают работать уже при 10 %.

Влияние пропусков данных. Далее исследовано влияние доли пропусков q при отсутствии аномальных ошибок. С уменьшением числа доступных пеленгаторов возрастает геометрическая неопределенность, что приводит к увеличению разброса частных угломерных решений.

Результаты показывают, что при $q \leq 0.25$ кластерно-вариационный метод обеспечивает стабильную идентификацию ИРИ при приемлемом уровне точности. При дальнейшем увеличении q происходит снижение плотности множества частных решений, что затрудняет формирование устойчивого кластера. Тем не менее, даже при $q \approx 0.4$ метод сохраняет преимущество по сравнению

с классической координатометрией. Это объясняется тем, что кластерный метод не требует, чтобы все пеленгаторы были доступны – достаточно, чтобы количество доступных пеленгаторов было не менее четырех.

Влияние разноточности каналов. В условиях разноточности измерительных каналов наблюдается искажение структуры множества частных решений за счет преобладающего вклада менее точных пеленгаторов. Для классических методов это приводит к смещению результирующей оценки в сторону шумных каналов.

Кластерно-вариационный метод демонстрирует меньшую чувствительность к увеличению коэффициента разноточности k. При значениях $k \leq 5$ рост ошибки является незначительным, а вероятность корректной координатометрии остается высокой. При дальнейшем увеличении k наблюдается постепенное ухудшение характеристик, однако метод продолжает сохранять работоспособность вплоть до $k = 10$.

Влияние асинхронности измерений. Асинхронность измерений оказывает существенное влияние на точность координатометрии при наличии движения ИРИ. Для классической координатометрии рост временной рассинхронизации Δt приводит к формированию веера ложных пересечений и резкому увеличению ошибки.

Кластерно-вариационный метод в условиях асинхронности формирует расширенное множество частных решений, структура которого остается кластеризуемой вплоть до определенных значений Δ_t. Результаты моделирования показывают, что при умеренной асинхронности метод обеспечивает устойчивую идентификацию ИРИ и позволяет существенно снизить влияние разновременности измерений по сравнению с классическими подходами.

Совместное воздействие факторов деградации. На заключительном этапе рассмотрено совместное влияние аномальных измерений, пропусков данных и асинхронности. В этих условиях наблюдается наиболее выраженная деградация характеристик всех алгоритмов. Тем не менее кластерно-вариационный метод демонстрирует наибольшую устойчивость и сохраняет работоспособность в областях параметров, недоступных для классической координатометрии.

Полученные зависимости позволяют определить практические границы применимости метода:

- допустимая доля аномальных измерений: $p \le 0.4$;
- допустимая доля пропусков: $q \le 0.4$;
- минимальное число пеленгаторов для устойчивой работы: $M_{\text{дп}} \ge 4$;
- допустимый коэффициент разноточности: $k \le 10$.

Заключение

Проведено исследование устойчивости кластерно-вариационного метода координатометрии источников радиоизлучения в условиях деградации измерительной информации. Введены показатели устойчивости, позволяющие количественно оценивать влияние аномальных измерений, пропусков данных, разноточности каналов и асинхронности наблюдений.

По результатам численного моделирования показано, что кластерно-вариационный метод обеспечивает существенный выигрыш в надежности и точности по сравнению с классическими методами координатометрии. При доле аномальных измерений до 30 % вероятность корректной координатометрии остается близкой к единице, а при доле до 40 % – превышает 0,9. Для классических методов критический порог составляет 10 %.

Метод сохраняет работоспособность при пропуске до 40 % измерительных каналов и при коэффициенте разноточности до 10 %. В условиях асинхронности наблюдений метод также демонстрирует преимущество перед классическими подходами благодаря сохранению кластеризуемой структуры частных решений.

Полученные количественные границы работоспособности метода (допустимая доля аномальных измерений до 40 %, допустимая доля пропусков до 40 %, минимальное число эффективных пеленгаторов – 4) могут быть использованы при проектировании и анализе многопозиционных комплексов радиоэлектронной борьбы, функционирующих в условиях априорной неопределенности и аномальных измерений.

Литература

1. Ширман Я.Д. Радиоэлектронная разведка. – М.: Радиотехника, 2006.
2. Булычев Ю.Г., Чепель Е.Н. Оптимизация кластерно-вариационного метода построения многопозиционной пеленгационной системы для условий априорной неопределенности // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 4. –С. 96–114.
3. Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Голубев Д.Ю. Робастный метод координатометрии излучающих целей на базе триангуляционных комплексов в условиях неопределенности // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 8. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.5
4. Huber P.J. Robust Statistics. New York: Wiley, 1981.
5. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация и радионавигация. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004.
6. Van Trees H.L. Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part I. New York: Wiley, 2001.
7. Jain A.K., Murty M.N., Flynn P.J. Data clustering: A review // ACM Computing Surveys. 1999. – V. 31. – No. 3. – P. 264–323.
8. Lance G.N., Williams W.T. A general theory of classificatory sorting strategies. 1. Hierarchical systems // Computer Journal. 1967. – V. 9. – No. 4. – P. 373–380.

Для цитирования:

Голубев Д.Ю. Исследование устойчивости кластерно-вариационного метода координатометрии к условиям неопределенности // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 9. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.2