

Анализ метрологических характеристик средств измерения распределенной мобильной измерительной системы на основе опорной модели объекта

В. В. Алексеев¹, П. Г. Королев², Н. В. Орлова³, Д. В. Пименов⁴

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия

¹vvaekseev@etu.ru, ²pgkorolev@etu.ru, ³nvorlova@etu.ru, ⁴pikachu0125@yandex.ru

Аннотация. В докладе рассматриваются метрологические характеристики распределенных мобильных измерительных систем, используемых для контроля характеристик распределенных в пространстве объектов. Мобильные измерительные системы передвигаются по заданным маршрутам и производят измерения физических величин в заданных точках, в заданное время. С течением времени изменяются как метрологические характеристики средств измерений, так и значения контролируемых величин. Рассматриваются методы определения величины изменений метрологических характеристик средств измерения и значений контролируемой физической величины, анализируются отклонения результатов измерения относительно опорного значения. Для повышения точности и достоверности измерений рассмотрены алгоритмы их анализа.

Ключевые слова: распределенные мобильные системы; анализ метрологических характеристик; опорная модель

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределенные мобильные измерительные системы (РМИС), как правило, используются для контроля характеристик распределенных в пространстве объектов (ПРО). ПРО могут быть природными (например, территориальные экосистемы) или техногенными (транспортные системы, промышленные объекты и др.).

РМИС представляют собой структур, включающую центральную подсистему (сервер) и множество стационарных и передвижных (мобильных) измерительных подсистем (МИС).

МИС передвигаются по заданным маршрутам и производят измерения физических величин в заданных точках, в заданное время. При этом в центральной подсистеме формируется множество результатов измерений (база данных измерений). Предположим, что в системе работает $k=1, K$ МИС, которые производят измерения заданной физической величины x в $l=1, L$ точках, находящихся на маршруте ее движения, в заданное время t .

Обозначим период времени, за который все МСИ пройдут маршрут, проведут измерения во всех точках как $\Delta T_i = T_i - T_{i-1}$, где T_{i-1} – начало i -ого периода измерений, T_i – его окончание. Работа системы анализа начинается с первого периода – $\Delta T_1 = T_1 - T_0$ и может осуществляться до текущего – T (рис. 1).

В процессе работы РМИС будет формироваться база данных контрольных измерения (БДКИ) $X = \{x(k, l, t)\}$.

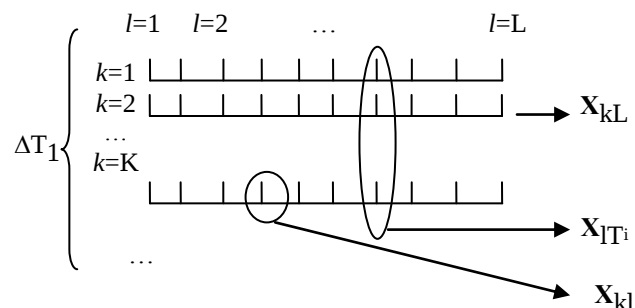


Рис. 1.

Так как с течением времени изменяются как метрологические характеристики (МХ) средств измерений (СИ), так и значения контролируемых величин, результаты содержат их величины.

В докладе рассматриваются методы определения величины изменений МХ СИ и значений контролируемой физической величины (ФВ). Для решения данной задачи введено понятие опорной модели объекта (ОМО), которая представляет собой базу данных, содержащую начальные значения контролируемых ФВ. Начальные значения ФВ являются опорными (образцовыми) при анализе результатов измерений – $X_0 = \{x_0(l)\}$. Они определяются на основе нормативной базы или в результате проведения измерений образцовыми средствами.

Анализу подвергаются значения отклонения результатов измерения $x(k, l, t)$ относительно опорного

значения $x_0(l)$ для разных подмножеств БДКИ $\theta = x(k,l,t) - x_0(l)$.

Результат измерения отклонения значения ФВ от опорного содержит значение изменения как самой ФВ, так и МХ СИ. Для повышения точности и достоверности измерений рассмотрим алгоритмы их анализа. Для этого множество результатов всех измерений представим в виде ряда подмножеств, отражающих специфику измерений и цель их анализа.

Подмножества.

Подмножество результатов измерений (ПРИ) в заданной точке l , k -ой МИС за определенное время $t - X_{kl} = \{x(k,l,t)\}$, где $k=const$, $l=const$, $t=var$.

ПРИ k -ой МИС во всех точках $l=1,L$, за определенное время $\Delta T_i - X_{kL} = \{x(k,l,t)\}$, где $k=const$, $l=var$, $t=const$.

ПРИ k -ой МИС в заданных точках l , за заданный период времени $t - X_k = \{x(k,l,t)\}$, где $k=const$, $l=var$, $t=var$.

ПРИ в заданной точке l , всеми МИС за заданный период времени $\Delta T_i - X_{lTi} = \{x(k,l,t)\}$, где $k=var$, $l=const$, $t=var$.

Полная база данных $- X_k = \{x(k,l,t)\}$, где $k=var$, $l=var$, $t=var$.

II. АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

A1. Математическое ожидание (МО) отклонения результатов измерений в заданной точке l на подмножестве X_{kl} :

$$M_{\theta lk} = \sum_{\substack{k=const \\ l=const \\ t \in \Delta T}} \theta l k t$$

A2. Математическое ожидание (МО) отклонения результатов измерений k -ой МИС на подмножестве X_{kL} :

$$M_{\theta lk} = \sum_{\substack{k=const \\ l \in L \\ t=const}} \theta l k t$$

A3. Математическое ожидание (МО) отклонения результатов измерений в заданных точках l на подмножестве X_k :

$$M_{\theta lk} = \sum_{\substack{k=const \\ l \in L \\ t \in \Delta T}} \theta l k t$$

A4. МО отклонения результатов измерений в заданной точке l , всеми МИС за заданный период времени на подмножестве X_{lTi} :

$$M_{\theta lk} = \sum_{\substack{k \in K \\ l=const \\ t \in \Delta T_i}} \theta l k t$$

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИ И ЗНАЧЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВЕЛИЧИН

Алгоритм определения погрешности СИ базируется на предположении, что суммарная погрешность в условиях нормальной работы исправных СИ носит случайный характер с математическим ожиданием, изменяющимся в пределах доверительного интервала, соответствующего классу точности СИ. Если же МХ СИ начнут изменяться, это проявится в виде изменения значения математического ожидания, появление большой систематической составляющей. Если эти предположения перенести на определение отклонений результатов измерений дефектов от опорных значений, может быть предложен следующий алгоритм.

Алгоритм

Для каждой МИС вычисляется $M_{\theta lk}(A1)$ и проводится анализ его характеристик:

а) если $\text{mod}(M_{\theta k}) \leq \text{mod}(p\sigma_{\text{си}})$, где p – заданная доверительная вероятность, $\sigma_{\text{си}}$ – СКО инструментальной составляющей СИ, характеристики СИ и контролируемых ФВ находятся в допустимых пределах, можно продолжать контрольные измерения;

б) если $\text{mod}(M_{\theta k}) > \text{mod}(p\sigma_{\text{си}})$, возможны два варианта:

1) *Определение метрологических характеристик СИ.* Большое значение МО получено за счет изменения МХ k -ой МИС; в этом случае необходимо провести анализ МО приращений всех K МСИ (A2); если условие выполняется только для одной МСИ, у данной системы изменились МХ, причем значение систематической составляющей определено и оно может быть скомпенсировано в имеющихся измерениях и при проведении дальнейших; если же условие выполняется для всех или большинства МСИ необходимо проанализировать второй вариант.

2) *Определение значений контролируемых величин.* Большое значение МО получено за счет резкого изменения контролируемой ФВ; в этом случае необходимо вычислить характеристику (A3) и провести анализ приращений каждой подлежащей анализу ФВ (алгоритм проверки на промах); если найдены значения значительно превышающие доверительный интервал необходимо для каждой точки вычислить характеристику (A4) и проверить на соответствие по результатам измерений других МСИ.

В случае, когда невозможно накопление репрезентативной выборки и есть сомнения в том, что результаты измерений распределены по нормальному закону, для проверки значимости расхождения выборок применяются непараметрические ранговые критерии. Далее приведен алгоритм работы для случая, когда результаты измерения параметров дефекта представлены малой выборкой.

Алгоритм: исходное состояние – нет ни одного результата по точке l (дефекту).

1. накопить 3 результата с короткими временными интервалами (желательно несколько проездов подряд);
2. при накоплении еще трех результатов применить критерий Манна-Уитни. Если расхождение значимо – зарегистрировать ситуацию, как требующую решения, ограничить базовую выборку тремя отсчетами;
3. если расхождение незначимо или находится в зоне неопределенности, проверить отличия рангов – если разошлись не более, чем на один результат, объединить выборки; иначе – новые три отсчета отнести к выборке №2 (рабочей выборке РВ);
4. если в выборке №1 (базовой БВ) оказалось 6 отсчетов, при наборе выборки №2 для проверки значимости расхождений достаточно ограничиться двумя отсчетами, при этом, критерий классифицирует расхождение как значимое, если выборки полностью не пересекаются;
5. если расхождение незначимо, то накопление рабочей выборки продолжается до пяти отсчетов, применяется критерий Манна и Уитни;
6. перевод рабочей выборки в состояние опорной рабочей выборки (ОРВ) происходит или при установлении значимости расхождения выборок, или при достижении объема выборки 60 отсчетов, максимального для применяемого критерия.

Представим работу программы обнаружения роста дефекта в виде графа состояний.

Состояния:

1. исходное – накопление базовой выборки;
2. накопление рабочей (текущей) выборки;
3. проверка значимости расхождения рабочей и базовой выборок;
4. проверка значимости расхождения опорной рабочей и рабочей выборок;
5. перевод рабочей выборки в состояние опорной рабочей выборки.

Условия:

У1 – количество отсчетов менее трех;

У2 – расхождение признаков рабочей и базовой выборок значимо;

У3 – расхождение признаков опорной рабочей и рабочей выборок значимо;

У4 – количество отсчетов в выборке достигло 60;

У5 – в качестве опорной рабочей выборки выступает базовая выборка.

Действия:

Д1 – объединение выборок;

Д2 – «закрытие выборки» (отсчеты в нее перестают добавляться);

Д3 – регистрация факта роста дефекта.

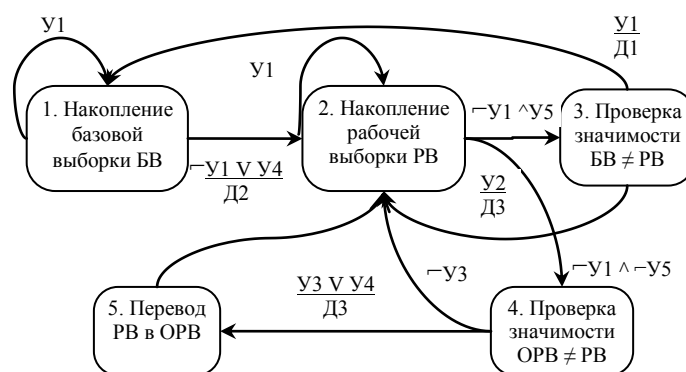


Рис. 2.

Для анализа изменения меры разброса малых выборок применяется критерий Зигеля–Тьюки [1]. В отличие от критерия Манна и Уитни, данный критерий требует нормального распределения выборок.

В технике часто применяется диагностика состояния по двум параметрам [3]. В таблице применены следующие обозначения: МР – расхождение мат. ожидания, РР – расхождение меры разброса, З – значимость, Н – незначимость, Р – рост, С – спад.

При анализе результатов многократных измерений двух выборок возможны ситуации, представленные в таблице.

ТАБЛИЦА I

ТАБЛИЦА СИТУАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДВУХ ВЫБОРОК

Мат. ожидание	Расхождение незначимо (МРН)	Расхождение значимо (рост) (МРЗР)	Расхождение значимо (спад) (МРЗС)
Мера разброса	Расхождение незначимо (РРН)	Расхождение значимо (рост) (РРЗР)	Расхождение значимо (спад) (РРЗС)

Проведем классификацию ситуаций.

С1 = МРН ^ РРН – стабильное состояние;

С2 = МРН ^ РРЗР – рост случайной составляющей: возможно влияние сезонного фактора, возможны метрологические отказы;

С3 = МРН ^ РРЗС – рост случайной составляющей: прекращение действия сезонного фактора;

С4 = МРЗР ^ РРН – значимость расхождения мат. ожиданий при незначительной случайной составляющей, позволяет уверенно идентифицировать рост дефекта;

С5 = МРЗР ^ РРЗР – предполагаемый рост дефекта, требуется дополнительная информация;

С6 = МРЗР ^ РРЗС – идентификация роста дефекта, снижение случайной составляющей;

С7 = МРЗС ^ РРН – признаки устранения дефекта;

$C8 = MP3C \wedge PP3P$ – значительное снижение мат. ожидания и рост случайной составляющей позволяет подозревать неисправность измерительного канала и провести техническую диагностику измерительной системы и ее калибровку;

$C9 = MP3C \wedge PP3CH$ – признаки устранения дефекта (может использоваться для оценки качества ремонта).

Таким образом, разработан алгоритм, предназначенный для обработки и анализа результатов, характеризующих величины дефектов железнодорожного пути. Рассмотренные диагностические ситуации для различных соотношений изменения меры среднего и меры разброса выборок результатов измерений параметров дефектов позволят принимать статистически обоснованные решения по состоянию железнодорожного пути.

Если результаты положительны, внести в протокол работы МСИ; далее для проверки МХ СИ исключить внесенные в протокол измерения и вернуться в начало алгоритма

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены принципы построения трехмерной базы данных результатов измерений мобильной ИС, алгоритмы

анализа результатов отклонения измерений в контрольных точках от опорных значений модели распределенного объекта, обеспечивающие определение метрологических характеристик средств измерений и увеличение точности измерений физических величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Опорная модель линейного участка железнодорожного полотна / В.В. Алексеев, Н.В. Орлова, Е.Н. Седунова // Тез. докл. XIX Межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2018), Том 2, СПб., май 2018 / СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2018. С. 256–259. DOI:10.1109/SCM.2017.7970657
- [2] Бортовая информационно-измерительная система оценки состояния железнодорожного пути. Метрологическое сопровождение/ В.В. Алексеев, А.М. Боронахин, П.Г. Королев, Н.В. Орлова // Тез. докл. XXII межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2019). СПб., 23–25 мая 2019/ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2018. С. 21–24.
- [3] Алгоритм идентификации диагностических признаков по параметрам вибрации компрессорной установки / В.В. Алексеев, П.Г. Королев, В.С. Коновалова, И.В. Калякин, А.Г. Перкова // Тез. докл. XVIII межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2015). СПб., 19–21 мая 2015 / СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2018. С. 221–224.