

**Математические модели и техническая реализация GOSA -
онлайн-системы геодезического мониторинга и оповещения о
деформациях природных и техногенных объектов,
основанная на точных спутниковых (GNSS) и наземных
геодезических наблюдениях (LPS/LS)**

Райнер Ягер¹, Симона Кэлбер, Андреас Хосциславский, Мануэл Освальд, Петер Шпон

Университет прикладных наук г.Карлсруэ (Hska),
факультет геоматики Института прикладных исследований (IAF),
D-76133 Karlsruhe, Moltkestrasse 30, Germany

URL: www.g.hs-karlsruhe.de

E-mail: reiner.jaeger@web.de

URL: www.goca.info

¹ Honorary Professor at Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Novosibirsk (www.ssga.ru).

Аннотация

Мультисенсорная система GOCA (GNSS/LPS/LS-based Online Control and Alarm System) используется для мониторинга и анализа деформаций объектов в режиме реального времени, на основе результатов геодезических измерений, полученных с использованием спутниковых навигационных систем GNSS/GPS, электронных тахеометров (LPS), обычных и гидростатических нивелиров, и локальных сенсоров (LS). GOCA была разработана для мониторинга стихийных бедствий, технических сооружений (например, плотин) и зданий. Система GOCA обрабатывает данные сенсоров в 3 этапа, выполняет уравнивание и анализ деформаций в реальном времени. Система вычисляет положение, скорость и ускорение для каждой точки объекта в единой трехмерной системе координат. В настоящей статье описываются используемые в системе математические модели геодезического мониторинга, основанные на классических методах уравнивания геодезических сетей, а также соответствующие принципы оценки и алгоритмы. Важнейшими этапами анализа деформаций являются, во-первых, трехмерная оценка смещений в реальном времени, во-вторых, фильтрация Калмана, которая предоставляет вектор состояния точек объекта, а также включает в себя прогнозирование и настройки оповещения об опасных смещениях. Интерфейсы входных и выходных данных системы GOCA имеют открытый формат и предназначены для всех видов результатов измерений и мониторинга. Все выходные данные GOCA могут в дальнейшем использоваться в комплексных системах анализа деформаций, таких, например, как модель конечных элементов FEM.

Сотрудничество университета прикладных наук Карлсруэ с вузами России в рамках проекта GOCA.

В рамках кооперации института прикладных исследований (IAF) университета Карлсруэ с научно-исследовательским центром «Геодинамика» (www.geodinamika.ru) Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), при сотрудничестве с московской фирмой ГФК (www.gfk-leica.ru) было

запланировано первое применение онлайн-системы контроля и оповещения GOCA для мониторинга исторических зданий Московского Кремля [11]. Полученные измерения были успешно обработаны программным обеспечением GOCA и результаты представлены на INTERGEO 2009 [12]. Дальнейшие совместные проекты, запланированные на основании меморандума о сотрудничестве, к осуществлению которых дополнительно привлекается фирма-партнер VMT GmbH г. Брухзаль (www.vmt-GmbH.de), направлены на обеспечение безопасности гидроэлектростанций (мониторинг деформаций, предупреждение об опасности). Первый пилотный проект GOCA (www.goca.info) с РусГидро (www.rushydro.ru) запланирован на лето 2010 г.

Программное обеспечение (ПО) GOCA, вместе с программой построения высотной модели геоида DFHBF, и программой мониторинга крупных GNSS-сетей, MONIKA (www.monika.ag), задействованы в совместном проекте контроля строительных сооружений на полуострове Ямал (РФ). В этом проекте участвует также Университет прикладных наук Берлина (www.beuthhochschule.de) и научно-исследовательский центр Ямала [13].

В марте 2010 года в Москве по программному пакету GOCA компанией «ГНСС плюс» (www.gnssplus.ru) были организованы курсы технических консультаций, проведенных научным руководителем проекта GOCA, профессором Райнером Ягером. В настоящее время компанией «ГНСС плюс» совместно с VMT GmbH г. Брухзаль активно проводятся работы по созданию тестовой сети мониторинга с включением программы GOCA как основного управляющего программного пакета.

Введение

Аппаратное обеспечение системы GOCA может включать в себя GNSS/GPS-приемники, электронные тахеометры и нивелиры, на основе их данных вычисляется вектор смещений $\mathbf{y}(t)$, скорости и ускорения точек объекта (см.рис.1, [5]-[8]). Для комплексного анализа деформаций [5] также могут использоваться локальные сенсоры (LS), как например, датчики натяжения и механического напряжения. В настоящее время система GOCA используется для мониторинга

более 30 крупных инженерных сооружений по всему миру [4]. Данные GNSS и LPS-наблюдений используются для создания классических геодезических сетей наблюдения за деформациями ([6], [10]), уравнивание которых происходит постоянно, в режиме online. Классическая геодезическая сеть для выявления деформаций состоит из стабильной области x_R и подвижных точек объекта $x_0(t)$ (рис. 1). Вычисления позиций x_R и $x_0(t)$ проводятся последовательно на 1-м и 2-м этапах анализа деформаций в системе GOCA. Уравненные на 2-м этапе временные ряды координат точек объекта $x_0(t)$ (сохраняются в формате *.FIN, см. рис. 2) и соответствующая ковариационная матрица $C_x(t)$ используются в дальнейшем для оценки векторов смещения в трехмерной системе координат $u_0(t)$, скорости $\dot{u}_0(t)$ и ускорения $\ddot{u}_0(t)$ точек объекта. 3-й этап – этап анализа деформаций в GOCA – проходит параллельно 2-му. Деформационный анализ включает такие компоненты, как: параметрическая модели оценки по скользящему среднему (MVE), классическая оценка смещений (SHT) и фильтрация Калмана (KAL) (рис. 2).

Данные $I(t)$ локальных сенсоров (LS) могут обрабатываться на 3-ем этапе анализа, применяя указанные выше методы оценки MVE, SHT и KAL непосредственно к вектору смещений $y(t)$, который моделирует исходные данные как непосредственные наблюдения. В качестве альтернативы при системном анализе может быть применен так называемый подход комплексного анализа деформации ([4], [8], [9]). Системный анализ или "комплексная модель" может применяться для геодезического мониторинга и обработки его результатов – а именно, $u_0(t)$, $\dot{u}_0(t)$ и $\ddot{u}_0(t)$, данных $I(t)$ локальных геометрических (например, инклинометры) и технических сенсоров (например, датчики давления) (LS), а также позволяет оценить дополнительные физические параметры p объекта. Схема потоков данных в системе GOCA и их интерфейсы показаны на рис. 2. Компоненты управления аппаратным обеспечением и коммуникационное программное обеспечение предназначены для управления сенсорами и передачи данных в массив сенсоров системы GOCA. Данные наблюдений GNSS/LPS/LS-сенсоров с отметкой времени предоставляются в открытом формате *.GKA [4]. Данные в *.GKA

сгруппированы по типам сообщений различных сенсоров. Структура GKA-файла адаптирована к выходным данным GNSS (базовые линии и сессии), стандарту LPS-наблюдений (зенитное расстояние, горизонтальное проложение, угол наклона, превышение) и выходным данным различных локальных сенсоров (LS).

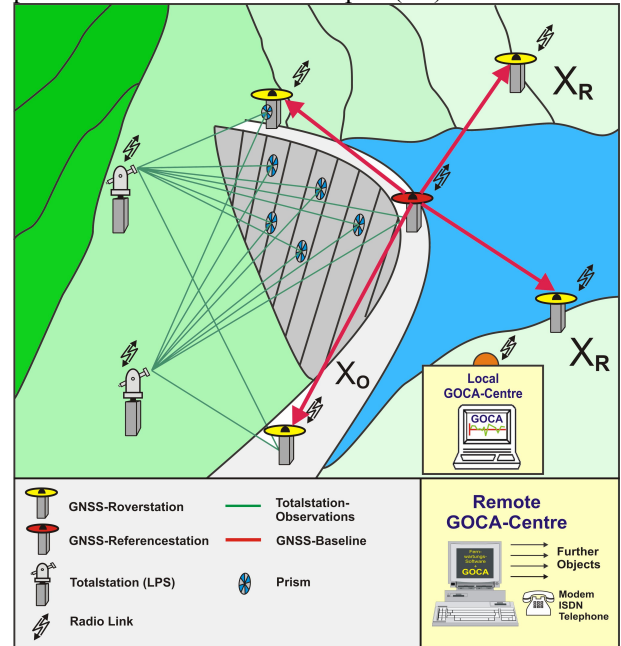


Рис.1: Классическое представление деформационной сети. Опорные точки x_R с подвижными объектными точками $x_0(t)$.

При обработке данных в режиме времени, близком к реальному, RINEX-файлы GNSS-измерений могут передаваться в программу GOCA, для дальнейшей обработки, с помощью соответствующего программного обеспечения, управляющего сенсорами (рис. 2). Результаты обработки RINEX-файлов конвертируются в формат GKA. Основной задачей и конечной целью анализа деформаций на 3-м этапе обработки в программе GOCA является настройка оповещения в случае обнаружения критических значений существенных параметров $u_0(t)$, $\dot{u}_0(t)$, $\ddot{u}_0(t)$, вычисленных во время MVE, SHT и KAL-оценивания. Соответствующие предупреждающие сообщения сохраняются в файлах формата *.ALR. Программа аварийного оповещения GOCA обрабатывает их совместно с информацией о сбоях сенсоров (тоже в формате *.ALR), создает и посылает предупреждения (например, SMA). Заархивированные файлы форматов *.FIN, *.MVE, *.SHT, *.KAL являются также открытым

интерфейсом выходных данных для всех видов дальнейшей обработки, таких как последовательная визуализация и анализ, оповещение, GIS и веб-анализ, представление (к примеру, в Google-Earth), вычисления для виртуальных сенсоров и системный анализ деформаций.

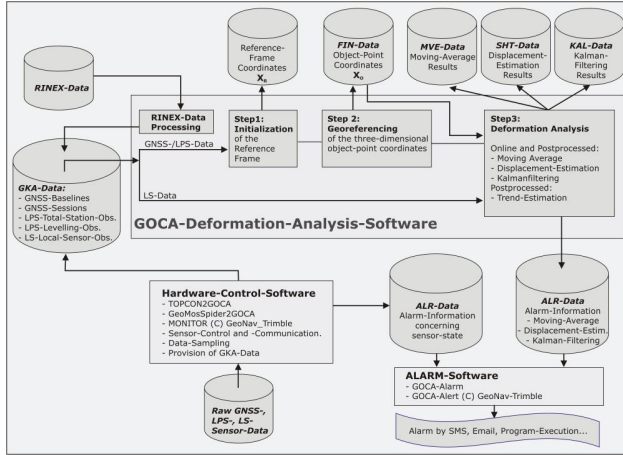


Рис. 2: Схема потоков данных и этапов анализа деформаций в ПО GOCA.

Концепция анализа деформаций в ПО GOCA.

Принципы оценки в системе онлайн-мониторинга

Оценка различных параметров \hat{y} (исходные координаты и координаты точек объекта, смещение и т.п.), как функций результатов измерений сенсоров $I = I(y)$ и их ковариационной матрицы C_1 , осуществляется в программе GOCA в три этапа (рис. 2). Оценка параметров основана на общей концепции М-оценки [6] в модели Гаусса-Маркова [3]. Основой модели Гаусса-Маркова являются два компонента – функциональная и стохастическая модели. Рассмотрим:

$$\tilde{I} = I - \varepsilon = I(\tilde{y}) \text{ и } C_1 \quad (1a,b)$$

Знак “~”, соответственно, обозначает так называемое ожидаемое или “истинное” значение результатов измерений и параметров. В этом смысле, полученные результаты наблюдений I должны быть исправлены с учетом ошибок измерений ε (1a). Первый этап М-оценки параметров y с помощью данных сенсоров I требует линеаризации функциональной модели (1a). Линеаризация основана на приблизительных значениях параметров y_0 . Что касается ошибок

наблюдений, из погрешностей v формируется вектор невязок, и мы получаем линеаризованную модель Гаусса-Маркова [3]. Рассмотрим

$$I + v = A \cdot \hat{y} + I(y_0) \text{ где } A(i, j) = \left. \frac{\partial I_i}{\partial y_j} \right|_{y_0} \text{ и } C_1 \quad (1c)$$

$$\hat{y} = y_0 + d\hat{y} \quad (1d)$$

где \hat{y} – оцениваемые параметры.

За линеаризацией следует гомогенизация модели (приведение к однородности) [3]:

$$\bar{A} = C_1^{-1/2} \cdot A, \bar{I} = C_1^{-1/2} \cdot (I - I(y_0)) \text{ и } \bar{v} = C_1^{-1/2} \cdot v \quad (1e)$$

М-оценка определяется с помощью минимизации так называемой функции оценки $\rho(\bar{v})$, усредненной ошибками результатов наблюдений \bar{v} (1e), с учетом линеаризованной части параметра $d\hat{y}$. Рассмотрим М-оценку [3]:

$$\sum_{k=1}^n \rho(\bar{v}_k) = \text{Min} |d\hat{y} \quad (1f)$$

$$\sum_{k=1}^n \rho((C_1^{-1/2} \cdot A)_k \cdot d\hat{y} - (C_1^{-1/2} \cdot (I - I(y_0))))_k \quad (1g)$$

Усредненные погрешности \bar{v} следует рассматривать как негативную оценку вышеупомянутой истинной усредненной ошибки результатов наблюдения $\bar{\varepsilon} = C_1^{-1/2} \cdot \varepsilon$. В зависимости от типа функции М-оценки $\rho(\bar{v}_k)$ [3], параметры \hat{y} (1d) оцениваются по методу наименьших квадратов, где $\rho(\bar{v}_i) = \frac{1}{2} \bar{v}_i^2$,

робастной оценкой L1, где $\rho(\bar{v}_i) = \frac{1}{2} |\bar{v}_i|$ и менее надежной оценкой Губера, где

$$\rho(\bar{v}_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \bar{v}_i^2 & \forall |\bar{v}_i| \leq k \\ |\bar{v}_i| & \forall |\bar{v}_i| > k \end{cases} \text{ . Пример соответствующих}$$

настроек для оценки смещения показан на рис. 4, справа. Устойчивость результатов измерений сенсора относительно суммарной погрешности ∇I задана - она подразумевает автоматическое сокращение влияния ∇I на результаты параметров \hat{y} (1d) - если первая производная $\psi(\bar{v}) = d\rho(\bar{v})/d\bar{v}$ ограничена, а именно, если

$$\left| \psi(\bar{v}) \right| = \left| \frac{d\rho(\bar{v})}{d\bar{v}} \right| < b \quad (1g)$$

Числовое решение М-оценки (1f) по модели Гаусса-Маркова (1c, d) может привести назад к итерационной оценке методом наименьших квадратов [3] с помощью усредненной модели Гаусса-Маркова (1e), где диагональная матрица

$$W(\bar{v}_i) = \text{diag}\left[\frac{\partial\psi(\bar{v}_i)}{\bar{v}_i}\right] \quad (1h)$$

используется как весовая матрица в методе последовательных приближений [3]. При применении к измерениям I в геодезической сети для выявления деформации, (рис. 1) М-оценка (1a-h) обеспечивает однозначную оценку параметров $\hat{y} = \hat{y}(I)$ в любое время t при избыточном и при достаточном количестве измерений.

М-оценка также предоставляет ковариационную матрицу $C_{\hat{y}}$ оценки параметров. Таким образом, вычисленные смещения имеют полную статистическую основу с учетом статистического анализа и оценки предполагаемых параметров $u(t)$, например, в контексте настройки оповещения (рис. 4), или обнаружения нестабильных базовых точек [5] и т.д. Поскольку, около 0,3% результатов наблюдений в сенсорной системе связаны с грубыми ошибками, наличие надежной М-оценки параметров (1f) с помощью функции ограничения влияния $\psi(\bar{v})$, параллельно с обычным методом наименьших квадратов, существенно увеличивает надежность системы онлайн геомониторинга на всех этапах оценки. Кроме того, надежная М-оценка параметров позволяет избежать ложного оповещения о грубых ошибках. В целом, она является неременным условием полного автоматического геомониторинга.

Этапы работы ПО GOCA

1-й и 2-й этапы работы ПО GOCA

Концепция анализа деформаций, реализованная в программных моделях GOCA, это так называемый классический геодезический анализ деформаций [4], который был полностью переведен в автоматический онлайн-режим [1]. Концепция геодезического анализа деформаций, основанная на уравнивании геодезической сети, в виде М-оценки (1f), начала развиваться в семидесятые годы [10]. В настоящее время концепция (1f) также является основой для современной онлайн системы геомониторинга, т.к. удовлетворяет требованиям к единообразию параметров во времени и пространстве, оптимальной точности

при нормальном распределении ошибок наблюдений и оценке методом наименьших квадратов, обеспечивает надежность с помощью ограничения влияния оценки параметров u , и предоставляет ковариационную матрицу для статистического анализа измерений. Линеаризованная модель Гаусса-Маркова для разных эпох наблюдений t_i и t_j на 1-м и 2-м этапах работы GOCA представлена следующей системой уравнений (рис. 1.):

$$I(t_i) + v_i = A_{Ri} \cdot x_{Ri} + A_{Oi} \cdot x_{O}(t_i) + C_{li} \quad (2a)$$

$$I(t_j) + v_j = A_{Rj} \cdot x_{Rj} + A_{Oj} \cdot x_{O}(t_j) + C_{lj} \quad (2b)$$

Символом A здесь обозначена матрица плана линеаризованной модели Гаусса-Маркова (1c,d), с данными наблюдений GNSS и LPS, и со стохастической моделью входных данных I . Основные параметры u в (2a,b), представляющие форму спроектированной сети для выявления деформаций (рис. 1), являются координатами базовых точек x_R и координатами точек объекта x_O . Дополнительные параметры соответствуют различным типам результатов измерений I , без нарушения общности (см. формулы (3a)-(3e)). Постоянство и стабильность области исходных пунктов (рис. 1) достигается за счет задания одинаковых координат $x_{Ri} = x_{Rj} = x_R$ для всех эпох измерений, в то время, как координаты точек объекта x_{Oi} и x_{Oj} вычисляются для каждой эпохи t_i и t_j [6]. Устойчивость опорных точек x_R должна быть проверена с помощью, так называемой расширенной модели Гаусса-Маркова, связанной с (2a,b) и строгой статистической концепцией [1].

Продолжительность эпох t_i и t_j по времени равна временному интервалу с продолжительностью Δt . Установленные интервалы должны быть равны интервалу взятия отсчетов сенсорами ΔT , или превышать его. Отметка времени эпохи t_i и t_j соответствует серединам последующих интервалов Δt . GNSS- и LPS-наблюдения I (2a, b), взяты из GNSS и LPS с целью разделения уравнивания сети в плане и по высоте. Таким образом, модель (2a,b) может легко быть использована в особых случаях, например, когда выполняется только вертикальный геодезический мониторинг с использованием гидростатических нивелиров. Большинство результатов измерений,

которые использованы в (2а, б), являются двумерными или одномерными GNSS-измерениями базовых линий. К данным наблюдений LPS, которые использованы в (2а, б), относятся горизонтальное проложение s_{ij} , угол наклона r_{ij} и превышение ΔH_{ij} . После введения дополнительных параметров, уравнение наблюдений, используемое в концепции геодезического мониторинга ПО GOCA, будет иметь вид ([4], [8]):

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{ij} \\ \Delta y_{ij} \end{bmatrix}_{\text{GNSS}} + \begin{bmatrix} v_{\Delta x,ij} \\ v_{\Delta y,ij} \end{bmatrix}_{\text{GNSS}} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_{ij} \\ \Delta \hat{y}_{ij} \end{bmatrix}, \quad (3a)$$

$$s_{ij} + v_{s,ij} = s \cdot \sqrt{\Delta \hat{x}_{ij}^2 + \Delta \hat{y}_{ij}^2}, \quad (3b)$$

$$r_{ij} + v_{r,ij} = \arctan\left(\frac{\Delta y_{ij}}{\Delta x_{ij}}\right) - o_i, \quad (3c)$$

$$\Delta h_{\text{GNSS},ij} + v_{\Delta h,ij} = \Delta \hat{h}_{ij} \quad \text{и} \quad (3d)$$

$$\Delta H_{\text{terr},ij} + v_{\Delta H,ij} = s_h \cdot \Delta \hat{h}_{ij} - \Delta v_m^T \cdot \hat{g}_m \quad (3e)$$

Помимо неизвестных координат $(\hat{x}, \hat{y} | \hat{h})$, которые должны быть разделены на опорные точки x_R и точки объекта x_0 согласно структуре сети (рис. 1), дополнительными параметрами в $y(t)$ являются масштабные коэффициенты s и s_h в плане и по высоте, неизвестный угол ориентирования линии o_i , и полиномиальные параметры

$$\hat{g}_m^T = (\hat{a}_{00} | \hat{a}_{10}, \hat{a}_{01} | a_{20}, \dots)_m^T \quad (3f)$$

в области m . Совокупность параметров \hat{g}^m формирует высотную модель поверхности относимости (геоид) в m -й локальной области объекта (см. www.dfhbf.de). Соответствующая строка матрицы плана для результата измерения $\Delta H_{\text{terr},ij}$ содержит разности так называемых векторов Вандермонда:

$$\Delta v_{m,ij}^T = (1 | x_j^1, y_j^1 | x_j^2, x_j^1 y_j^1, y_j^2 | \dots)_m - (1 | x_i^1, y_i^1 | x_i^2, x_i^1 y_i^1, y_i^2 | \dots)_m \quad (3g)$$

сформированных из локальных координат точек в области m . Учитывая масштабируемость концепции геомониторинга в GOCA и возможность ее применения для поверхности любого размера, можно ввести любое количество m . Таким образом, можно осуществлять

мониторинг нескольких объектов с разными настройками параметров в единой расширенной системе координат x_R (3f). В ПО GOCA деформационная сеть может быть поделена на различные области (рис. 1) [4].

Инициализация, а именно 1-й этап, базируется на свободном уравнивании участка сети для геомониторинга методом наименьших квадратов (L2-норма) с помощью GNSS- и LPS-данных, используемых в модели Гаусса-Маркова, как показано в (2а,б). Выполнение 1-го этапа также связано с уравнениями результатов измерений (3а-е) и обеспечивает создание области опорных точек x_R геодезической сети мониторинга (рис.1). Параметры y этапа инициализации зависят от используемых типов сенсоров. Настройка инициализации (1f) данных сенсоров I выполняется для начальной эпохи, заданной пользователем, и интервала инициализации. Для этого используется оценка по методу наименьших квадратов, где $\rho(\bar{v}_i) = \frac{1}{2} \bar{v}_i^2$, и производится обеспечение робастности с учетом грубых ошибок ΔI автоматической итерационной процедурой слежения за данными (data snooping)[3].

2-й этап анализа деформаций в GOCA связан с разделением сети (2а, б), уравнениями результатов измерений (3а-е), и их оценкой по формуле (1f). 2-й этап обеспечивает постоянную трехмерную координатную привязку точек объекта $x_0(t)$ в пространстве опорных точек x_R (рис. 1). Выполнение 2-го этапа: оценка позиций точек объекта $x_0(t)$, создание их ковариационной матрицы $C_0(t)$, сохранение результатов

$$x_0(t) \text{ и } C_0(t) \quad (4a,b)$$

в ежедневных FIN-файлах (рис. 2), происходит в режиме онлайн.

Визуализация временных рядов координат x (зеленый), y (синий) и h (красный) точек объекта $x_0(t)$, показана на рис.3. Координаты исходных пунктов x_R , вышеупомянутые дополнительные параметры и специфические параметры наблюдений s , s_h и \hat{g}^m (кроме неизвестного угла ориентирования o_i) сохраняются на 2 этапе как фиксированные, в соответствии с результатами 1-го этапа. Таким образом, устраняется любое влияние ошибок результатов измерений на сеть

геомониторинга x_R , и уменьшается риск ошибочного аварийного оповещения. Ковариационная матрица фиксированного набора параметров в пределах y тем не менее строго учитывается при вычислении $C_O(t)$ (4b) и, как упоминалось выше, стабильность области опорных точек x_R можно контролировать статистически.

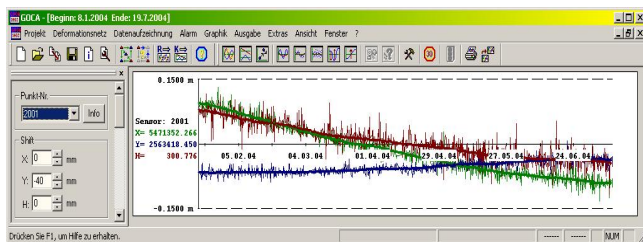


Рис. 3: Временные ряды координат $x_O(t_i)$ как результат 2-го этапа. Толстыми линиями показано сглаживание с помощью оценки скользящего среднего значения (MVE) (3-й этап).

3-й этап работы GOCA – анализ деформаций

На 3-м этапе работы GOCA, а именно на этапе анализа деформаций, проводится оценка параметров $y(t)$ различных функций обнаружения деформаций, так же на основе формулы (1f). Оценка параметров производится в онлайн режиме, параллельно 2-му этапу. Ввод результатов измерений ($I(t)$, $C_1(t)$) основан на временных рядах координат точек объекта $x_O(t)$ и $C_O(t)$ (4a,b), сохраненных в виде FIN-файлов в проекте GOCA (рис. 2).

Оценка скользящего среднего значения

Первой, и простейшей, функцией $y(t)$ измерения взаимосвязанного смещения точек объекта, предоставленной в ПО GOCA, является оценка скользящего среднего значения (MVE), где $x_O(t)$ и $C_O(t)$ являются прямыми измерениями с учетом позиции MVE $y(t)^T = (x(t), y(t), h(t))$ для каждого измеренного интервала. Толстые линии на рис. 3 обозначают сглаженные значения трех компонентов оценки MVE $y(t)$. MVE-оценка в GOCA включает настройки оповещения (рис. 2) при критических, по сравнению с текущими, смещениях $u(t) = y(t) - x_O(t_0)$, полученных относительно исходных позиций точек объекта

$x_O(t_0)$. Данные локальных сенсоров $I(t)$ (например, датчиков натяжения и механического напряжения, инклинометров) и их ковариационная матрица $C_1(t)$, также могут использоваться для оценки скользящего среднего значения (MVE).

Онлайн-оценка смещения

Второй функцией оценки деформации и вектором параметров анализа деформации 3-го этапа GOCA является онлайн-оценка смещения (SHT) (см. рис.2) между разными “длительными эпохами” t_0 и t_i . Выражение “длительные эпохи” означает, что две эпохи t_0 и t_i начались в моменты времени t_0 и t_i , и продолжались в течение интервалов Δt_0 и Δt_i , например, 1 час (рис. 4). Началом первой эпохи t_0 может быть момент инициализации (1-й этап). Альтернативно t_0 может быть задана с помощью настроек в ПО GOCA (рис. 4), либо произвольно устанавливаемой или динамически перемещаемой временной маркой. Рассмотрим функциональную модель оценки смещения точек объекта:

$$\begin{bmatrix} I_{t_0} \\ I_{t_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{t_0} \\ v_{t_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & \mathbf{0} \\ E_2 & E_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_0 \\ \hat{u}(t) \end{bmatrix} = A \cdot \hat{y} \quad (5a)$$

$$\hat{y} = [\hat{x}_0(t_0), \hat{u}(t_0, t_i)]^T \quad (5b)$$

Две группы результатов измерений I_{t_0} и I_{t_i} и их ковариационная матрица взяты из данных временных рядов точек объекта ($x_O(t)$, $C_O(t)$) (4a,b) (см. рис. 3, тонкие линии). Величина v обозначает погрешность измерений (1c). Параметрами деформации $\hat{y}(t)$ для каждой точки объекта являются трехмерная уравненная позиция $\hat{x}_0(t_0) = [\hat{x}, \hat{y} | \hat{h}]^T$ на эпоху t_0 и 3D-смещения $\hat{u}(t_0, t_i) = [u_x, u_y | u_h]_{t_0, t_i}^T$ между t_0 и t_i . Матрицы плана E_1 и E_2 – это столбцовые матрицы, элементами которых являются матрицы размерностью 3×3 для каждого трехмерного результата измерения $x_O(t)$ в соответствующих интервалах эпох Δt_0 и Δt_i . Рис. 4 показывает настройки ПО GOCA для онлайн оценки смещения, в соответствии с (5a,b). Настройки могут быть различными, в зависимости от выбора точек объекта, определения эпохи для оценки

смещения, настроек уравнивания и статистической проверки, а также настроек автоматического оповещения (ALR-файлы, рис. 2).

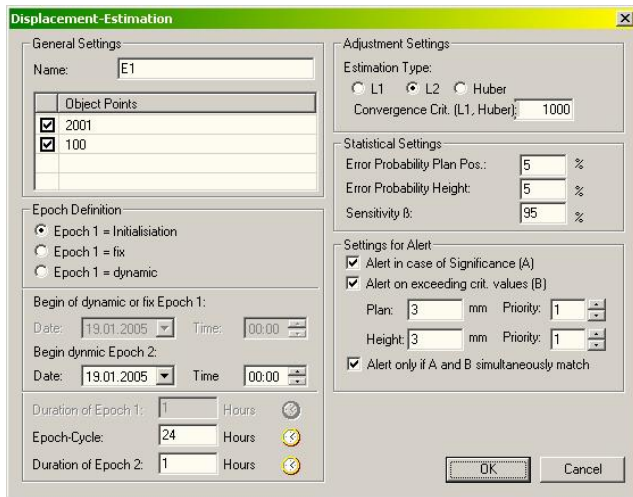


Рис. 4: Настройки онлайн оценки смещения (SHT) и оповещения в системе GOCA

Автоматическая оценка смещения между различными “длительными эпохами” $\Delta t(t_i)$ (например, 3 часа) может быть произведена в одном из 3х режимов, а именно

- 1-я эпоха = статичная, задана во время инициализации (1-й этап работы GOCA). 2-я эпоха периодически повторяется (например, каждые 24 часа).
- 1-я эпоха = статичная, установлена пользователем. 2-я эпоха периодически повторяется.
- 1-я эпоха = периодически повторяется, как и 2-я эпоха.

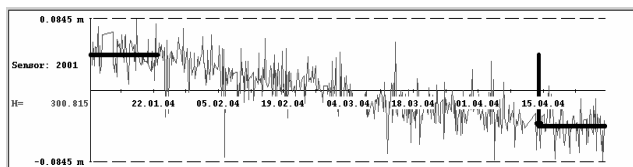


Рис. 5: Визуализация оценки смещения $\hat{y} = [\hat{x}_0(t_0), \hat{u}(t_0, t_i)]^T$ на 3-м этапе работы ПО GOCA.

На рис. 5 толстой горизонтальной линией слева показана оценка $\hat{x}_0(t_0)$ (5a,b) по нескольким результатам измерений $x_0(t_i)$ (4a),

принадлежащих начальному моменту времени t_0 с интервалом оценивания $\Delta t(t_0)$. Толстая горизонтальная линия справа показывает оценённое положение $\hat{x}(t_i) = \hat{x}_0(t_0) + \hat{u}(t_0, t_i)$ на момент времени t_i . Толстая стрелка показывает предполагаемое перемещение $\hat{u}(t_0, t_i)$ в вертикальной составляющей. Опять же, для оценки смещения (SHT) могут быть использованы данные локальных сенсоров (LS).

Фильтрация Калмана в ПО GOCA. Прогнозирование и своевременное предупреждение.

Фильтр Калмана – третий компонент оценки параметров деформации на третьем шаге работы системы GOCA. Он относится к так называемому уравнению перехода $T(t)$ параметрического вектора смещения $y(t)$. Для перехода от смещения в предыдущий момент времени $(t - \Delta t)$ к смещению на текущий момент t , имеем

$$y(t) = T(t) \cdot y(t - \Delta t), \text{ где} \quad (6a)$$

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \\ \ddot{u}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & [\Delta t] & \left[\frac{1}{2} \Delta t^2 \right] \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & [\Delta t] \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u(t - \Delta t) \\ \dot{u}(t - \Delta t) \\ \ddot{u}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad (6b)$$

$$y(t) = [u(t), \dot{u}(t), \ddot{u}(t)]^T \quad (6c)$$

Вектор смещения $y(t)$ фильтра Калмана включает в себя трехмерное смещение $u(t)$, скорость $\dot{u}(t)$ и ускорение $\ddot{u}(t)$ каждой точки объекта $x_0(t)$ между двумя последовательными интервалами времени Δt .

Модель изменения состояния (6a, b, c) является рядом Тэйлора неизвестной функции смещений $u(t)$, у которого отброшены все члены после второго (постоянное ускорение в пределах интервала), и который широко используется в геодезическом мониторинге медленных движений точек объекта и движений со средней скоростью, например, оползней и т.п. [1]. Ковариационная матрица C_y прогноза $y(t)$ (6b, c) вычисляется согласно закону распределения ошибок ковариационной матрицы предыдущего вектора состояния $y(t - \Delta t)$ и, соответственно, предыдущих итераций фильтра Калмана. Результаты измерений $I(t)$ и их ковариационная матрица для фильтрации

Калмана, которые связаны с тем же вектором изменения состояния (6с), являются вычисленными GOCA смещениями $\mathbf{u}(t)$ в интервале времени Δt . Уравнение наблюдения $\mathbf{l}(t)$ в момент времени t записывается как

$$\mathbf{l}(t) = \mathbf{l}(\mathbf{y}(t)) =: \mathbf{u}(t) = \mathbf{x}_O(t) - \mathbf{x}_O(t_0), \quad (6d)$$

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}_{x_O}(t) + \mathbf{C}_{x_O}(t_0). \quad (6e)$$

Результаты измерений $\mathbf{l}(t)$ (6d) – разница между настоящим положением точки объекта $\mathbf{x}_O(t)$ (4а), полученными на 2-м этапе GOCA (FIN-файл) во временном интервале $[t, t - \Delta t]$, и исходными координатами $\mathbf{x}_O(t_0)$, полученными в начале фильтрации Калмана. Сам фильтр Калмана эквивалентен общей оценке (1f) спрогнозированного вектора состояния $\mathbf{y}(t)$ (6с) и вектора состояния, вычисленного из наблюдений $\mathbf{l}(\mathbf{y}(t))$ на момент времени t (6d). Общая M-оценка (1f) параметров $\hat{\mathbf{y}}(t)$ для этих двух компонентов наблюдения (6а) и (6d) и их стохастических моделей \mathbf{C}_y и \mathbf{C}_1 может быть итерационно вычислена, как:

$$\hat{\mathbf{y}}(t)^{(j)} = \mathbf{y}(t) + \mathbf{K}^{(j)} \cdot (\bar{\mathbf{l}}(t) - \bar{\mathbf{l}}(\mathbf{y}(t))), \quad \text{где} \quad (6d)$$

$$\mathbf{K}^{(j)} = (\mathbf{C}_y^{-1/2} \mathbf{W}_y^{(j)} \mathbf{C}_y^{-1/2} + \bar{\mathbf{A}} \mathbf{W}_1^{(j)} \bar{\mathbf{A}})^{-1} \cdot \bar{\mathbf{A}} \mathbf{W}_1^{(j)} \quad (6e)$$

Так называемая матрица Калмана $\mathbf{K}^{(j)}$ вычисляется итерационно ($j=j$ -й шаг). На j -ом шаге итерации диагональные весовые матрицы $\mathbf{W}_y^{(j)}$ и $\mathbf{W}_1^{(j)}$ в рамках $\mathbf{K}^{(j)}$ настраиваются согласно (1h). Так же, как онлайн оценка смещений SHT (5а, b), фильтрация Калмана в системе GOCA может осуществляться путем подстановки в (1f), либо с использованием метода наименьших квадратов или робастной оценки L1. Результаты $(\hat{\mathbf{y}}(t), \mathbf{C}_{\hat{\mathbf{y}}}(t))$ сохраняются как файлы фильтра Калмана в формате KAL, см. рис. 2. Результаты измерений локальных сенсоров $(\mathbf{l}(t), \mathbf{C}_1(t))$ могут быть использованы как входные данные фильтра Калмана. Уравнение (6b) позволяет предсказать время Δt , за которое будут достигнуты заданные критические значения вектора смещения $\mathbf{y}(t)$ (6с). Это позволяет использовать GOCA как систему раннего оповещения.

Системный анализ: основные аспекты и научный вклад системы GOCA

В развитии методов анализа деформаций ясно прослеживается тенденция к объединению параметрических результатов геодезической оценки смещения (5а, b) и/или фильтрацию Калмана (6а, b, c), а именно $\mathbf{u}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ и $\ddot{\mathbf{u}}(t)$, с геометрическими и физическими наблюдениями $\mathbf{l}(t)$ локальных сенсоров (LS) в общую модель ([2], [5]). Учитывая тот факт, что оба типа функций измерения деформации наблюдают за состоянием физического объекта (например, дамбы), необходимость физической модели для их интеграции становится очевидной. Согласно общепринятой классификации моделей, т.е. «черный», «серый» или «белый ящик», модель конечных элементов (FEM) принадлежит к типу «белый ящик» и характеризуется физическими параметрами \mathbf{p} , вектором изменения состояния и вектором выходных данных (рис.2) $\mathbf{u}_O(t)$, $\dot{\mathbf{u}}_O(t)$, $\ddot{\mathbf{u}}_O(t)$ геодезического мониторинга ([1], [5], [6], [14]). Таким образом, FEM является ключом для разработки комплексной геодезической системы мониторинга, использующей данные GNSS, LPS и LS сенсоров. Комплексные статические FEM-модели, разработанные создателями GOCA, успешно применялись и совершенствовались [9]. Однако, динамическая FEM-модель, также созданная командой разработчиков GOCA [1], все еще ждет дальнейшей оценки в комплексном динамическом моделировании [2].

Пример мониторинга дамбы с помощью системы GOCA

Наблюдение за дамбой Копс, находящейся высоко в Альпах на территории Австрии, с помощью системы GOCA на основании данных GNSS велось около года (рис.7). Первый из трех одночастотных GPS приемников был установлен в качестве базовой станции в месте соединения дамбы со скалой, как точка объекта $\mathbf{x}_O(t)$. Второй GPS-ровер установили в центре дамбы тоже в качестве точки объекта $\mathbf{x}_O(t)$ (рис. 7 и 8). Третий GPS-ровер установили как опорную точку \mathbf{x}_R на устойчивом объекте, который находится в 500 м за пределами дамбы (рис. 9). Длины базовых линий, за которыми велись наблюдения, были равны, соответственно, 198 м и 500 м (рис. 8). Частота взятия отсчетов ΔT GNSS/GPS-приемниками составляла 2 минуты.



Рис. 7: Инсталляция системы GOCA: расположение пунктов объекта $x_O(t)$ на дамбе Копис, Австрия.

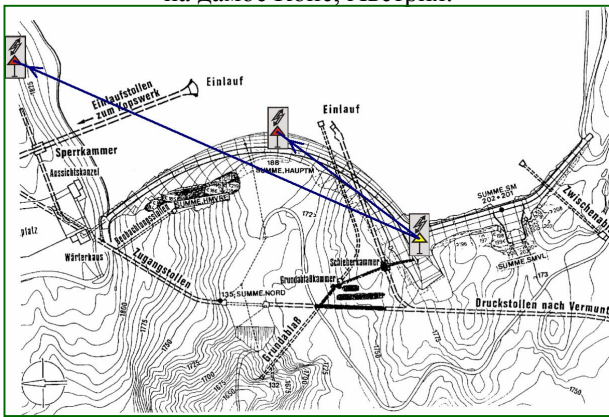


Рис. 8: Инсталляция системы GOCA: схема базовых линий. Стабильная точка X_R (слева), в режиме ровера. Точки объекта $x_O(t)$ в режиме ровера (центр), и GPS-базовой станции (справа)



Рис. 9: Установка опорной точки X_R (слева) и точки объекта $x_O(t)$ в месте соединения дамбы со скалой (справа)

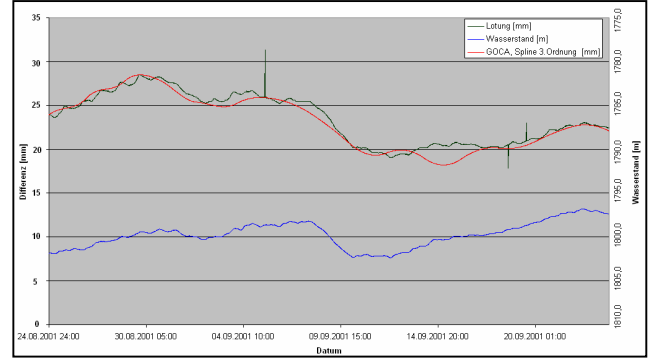


Рис. 10: Вычисление смещения (красная линия) объектного пункта в центре дамбы $x_O(t)$ с помощью GOCA.

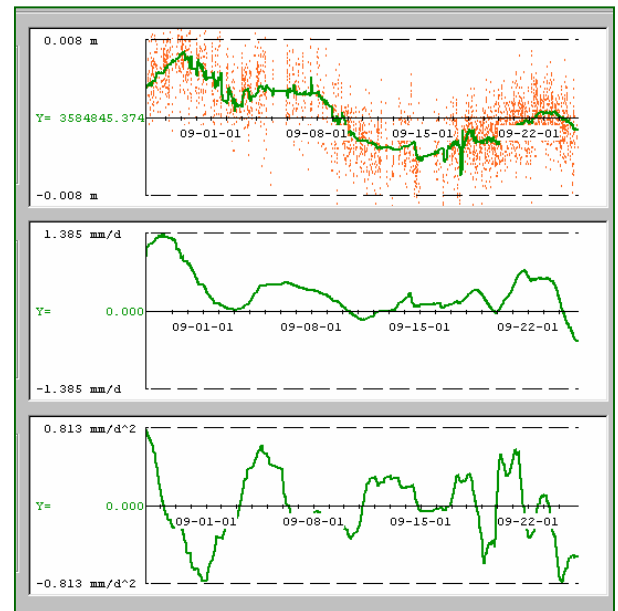


Рис. 11: Результаты оценки смещения $u(t)$, скорости $\dot{u}(t)$ и ускорения $\ddot{u}(t)$ пункта $x_O(t)$ в центре дамбы фильтром Калмана. Интервал времени тот же, что на рис. 10

На рис. 10 показано сравнение горизонтального смещения точки $x_O(t)$ в центре дамбы вдоль координатной оси, перпендикулярной дамбе, вычисленное по данным GPS (красная линия) и классическим способом – наблюдение за лотом в теле дамбы (зеленая линия) в течение 4 недель. Синей линией показано изменение уровня воды. Смещения, вычисленные на основе данных GPS-приемников с помощью MVE-оценки GOCA, с точностью до миллиметра соответствуют показаниям смещения лота. Поскольку GPS-приемник находится приблизительно на 8 м выше

лота (рис. 9, справа), их графики тоже расходятся. На рис. 11 показаны результаты фильтрации Калмана ПО GOCA за тот же интервал времени, что на рис. 10, с учетом параметрического вектора $y(t)$, т.е. смещения $u(t)$, скорости $\dot{u}(t)$ и ускорения $\ddot{u}(t)$ пункта $x_0(t)$, находящегося в центре дамбы. Оранжевые точки показывают временные ряды результатов измерений точек объекта $u(t)$ (6d) в системе GOCA.

Заключение

Метод уравнивания фундаментальной сети в GOCA обеспечивает единую пространственную привязку и оценку состояния деформаций, т.е. смещений, GNSS/LPS-сенсоров на точках объекта в системе координат опорных точек. Для геодезического онлайн-анализа смещений точек объекта может быть выбран гибкий, определяемый пользователем MVE, или оценка смещения (SHT), или фильтр Калмана (смещение, скорость и ускорение). Данные локальных сенсоров (LS) также могут быть проверены системой GOCA на 3-м этапе работы. Применение метода наименьших квадратов и робастной оценки в процедурах анализа деформации позволяет так настроить систему оповещения, чтобы она срабатывала только в случае достижения критического состояния, доказанного

статистической проверкой. Оценка непрерывных временных рядов смещений объектов и вектора состояния локальных сенсоров, обеспеченная GOCA, открывает новые перспективы в анализе деформаций и калибровке моделей. Что касается представленного перехода от классического геометрического анализа деформации к т.н. системному анализу, то этого требуют интересы геодезии и других дисциплин, таких, как геодинамика, геотехника и гражданское строительство. Что касается мониторинга деформации структур, дальнейшее развитие математических моделей будет осуществляться путем интеграции дополнительных параметров (как например, параметры материалов, модели повреждения), так и дополнительных приборов (например, тензомер и инклинометр) с использованием системного анализа. Представленный выше пример использования системы GOCA для наблюдения за дамбой показывает, что с помощью постоянного геодезического мониторинга можно получить высокоточный вектор изменения $y(t)$ смещения $u(t)$, скорости $\dot{u}(t)$ и ускорения $\ddot{u}(t)$ точек объекта. Эта информация может быть использована в дальнейшем для долговременного прогноза состояния плотины.

Благодарность

За помощь при подготовке этой статьи и ее перевод на русский язык авторы выражают благодарность сотруднику проекта GOCA Михаилу Петрову, студенту факультета геоматики Тарасу Карбовнику, аспирантке Сибирской государственной геодезической академии Татьяне Гороховой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Jäger, R. and S. Kälber (2001): GPS-based Online Control and Alarm System (GOCA) - A Geodetic Contribution for Hazard Prevention. Proceedings International Conference on Landslides Causes, Impacts and Countermeasures. Davos, Switzerland, June 17-21. (In: Kühne, Einstein, Krauter, Klapperich, Pöttler (Eds.)), ISBN 3-7739-5969-9 Runge, GmbH, Cloppenburg. S. 261 – 275
- [2] Eichhorn, A. (2005): Ein Beitrag zur Identifikation von dynamischen Strukturmodellen mit Methoden der adaptiven Kalman-Filterung. DGK-C Nr. 585. Deutsche Geodätische Kommission, München.
- [3] Jäger, R.; Müller, T.; Saler, H. and R. Schwäble (2005): Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren - Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern. ISBN 3-87907-370. Wichmann Verlag.
- [4] Jäger, R. and S. Kälber (1999-2009): www.goca.info. GOCA-WebSite.
- [5] Kälber, S. and R. Jäger (2000): Realization of a GPS-based Online Control and Alarm System (GOCA) and Preview on Appropriate System Analysis Models for an Online Monitoring. Proceedings of the 9th FIG-Symposium on Deformation Measurement and Analysis. Sept. 1999, Olsztyn, Poland. p. 98 -117.
- [6] Jäger, R., Weber, A. und R. Haas (1997): Ein ISO 9000 Handbuch für Überwachungsmessungen, DVW-Schriftenreihe, Heft Nr. 27, Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- [7] Jäger, R. and F. Gonzalez (2005): GNSS/GPS/LPS based Online Control and Alarm System (GOCA) - Mathematical Models and Technical Realisation of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Hazard Prevention. IAG Series on Geodesy Symposia. Springer. ISBN 3540385959. S. 293 – 304.

- [8] Jäger, R. (2008): Geodetic Monitoring Systems – Profile and Mathematical Modelling for a Scaleable Structural Deformation Analysis and Realization by the Monitoring System GOCA. Proceedings FIG WG 6.3 Workshop “Current Challenges of Engineering Surveys”, Siberian State Academy of Geodesy (SSGA). ISBN 9785876932822.
- [9] Lienhart, W. (2007): Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data. Dissertation, Series Engineering Geodesy TU Graz. Shaker-Verlag, Aachen.
- [10] Pelzer, H. (1971): Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen. DGK, Reihe C, Nr. 164, München.
- [11] Lobazov, V. (2009): Geodätisches Monitoring des Moskauer Kreml. Proceedings, 15. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, 2009. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [12] Jäger, R. und K. Fuchs (2009): Geodätisches Monitoring des Moskauer Kreml – Deformationsanalyse von Hebungen und Setzungen mit GOCA und GOCA-Virtual-Sensor. Posterpräsentation zur INTERGEO 2009, Karlsruhe. Posterdownload: www.goca.info.
- [13] Resnik, B., Lobazov, V. und V. Gerasimov (2010): Geodätische Überwachung von Bauwerken in polaren Regionen am Beispiel des Brückenübergangs über den Fluss Juribey (Russland). Proceedings 16. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München, IV2010. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [14] Jäger, R., Hoscislawski, A. und M. Oswald (2009): GNSS/LPS/LS based Online Control and Alarm System (GOCA) – Mathematical Models and Technical Realization of a Scalable System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Analysis. p. In (E. Bauer, S. Semprich and G. Zenz (Eds.)): Proceedings of the 2nd International Conference “Long Term Behaviour of Dams”, October 2009. Verlag der Technischen Universität Graz, University of Technology. ISBN 9783851250701. p. 387 – 394.
- [15] Schneid, S. und M. Kohl: TUnIS - Система геомониторинга VMT GmbH. VMT GmbH, Bruchsal, Germany.