

# СПОСОБ ИТЕРАЦИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ КООРДИНАТ ПУНКТОВ ЛОКАЛЬНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Н.К. Шендрик (СГГА, Новосибирск)

В 1971 г. окончил Новосибирский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (в настоящее время — Сибирская государственная геодезическая академия, СГГА) по специальности «астрономо-геодезия». После окончания института работал инженером на Предприятии № 8 ГУГК СССР в астрономо-геодезической партии на фотографических наблюдениях ИСЗ, с 1979 г. — в НИС кафедры астрономии и гравиметрии НИИГАиК. С 1993 г. — заведующий лабораторией космической геодезии кафедры астрономии и гравиметрии, а с 2013 г. — заведующий кафедрой физической геодезии и дистанционного зондирования СГГА.

В связи с широким применением в геодезии спутниковых технологий постоянно возникают проблемы совмещения результатов, полученных спутниковыми методами, с исходными данными как в государственных, так и в местных системах координат (МСК). Переход от СК–42 к СК–95 позволил в какой-то мере сгладить данную проблему, но не устранить ее, так как точность СК–95 на порядок уступает потенциальной точности спутниковых измерений. Видимо отчасти и поэтому с 2017 г. предусматривается переход на геоцентрическую систему координат ГСК–2011, точность которой декларируется на уровне системы ITRF. Обратной стороной этих неизбежных реформ являются значительные издержки в повседневной работе всех, кто так или иначе связан с результатами геодезической деятельности. Возникает естественный вопрос: нельзя ли каким-либо образом сгладить эти издержки переходного периода? Один из возможных ответов — разделить процессы совершенствования государственных и местных (региональных) сис-

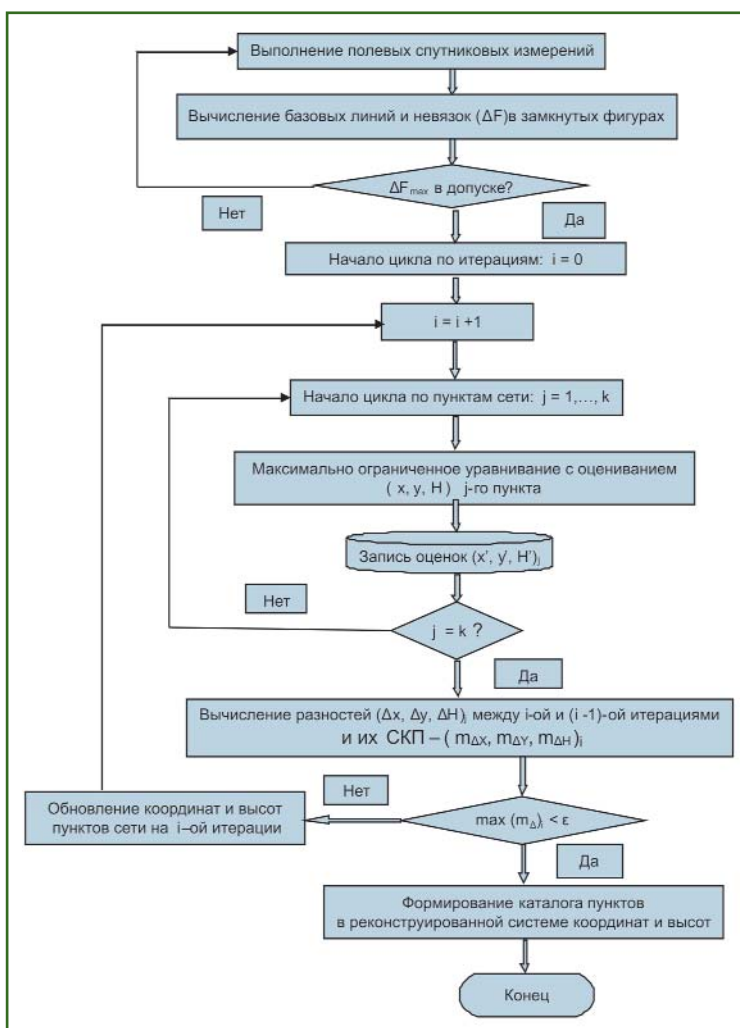


Рис. 1

Технологическая блок-схема реконструкции координат и высот пунктов геодезической сети способом итераций

тем координат. В регионах уже сейчас имеются возможности создавать МСК, соответствующие современным требованиям точности. Наиболее эффективно это может быть осуществлено на основе спутниковых геодезических сетей постоянно действующих базовых станций (ПДБС). Процесс создания сетей ПДБС происходит по инициативе регионов вне зависимости от состояния развития государственных программ, в частности СГС-1, и следует признать, что это неизбежный процесс. По мере развития региональных фрагментов высокоточных сетей они будут естественным образом включаться в государственную геодезическую сеть. Создание в регионах высокоточных МСК и, в первую

очередь, на основе сетей ПДБС, позволит решать задачи геодезического обеспечения регионов на долговременную перспективу, так как важнейшим свойством высокоточных систем координат является возможность их взаимного преобразования без потери точности. Для высокоточных МСК могут быть установлены точные связи как между собой, так и с системами типа ГСК-2011, ITRF и др. Для сохранения максимально возможной прецизионности наработанного материала в области геодезического обеспечения территорий целесообразно выполнять высокоточную реконструкцию существующих систем координат (МСК, СК-63, СК-42, СК-95 и др.). В данном контексте под

реконструкцией понимается комплекс мероприятий, направленных на улучшение функциональности объекта с целью повышения эффективности его использования без изменения основных свойств.

Для решения задач высокоточной реконструкции по спутниковым измерениям разработан способ итераций, технологическая блок-схема которого приведена на рис. 1. Сущность способа заключается в максимальном приближении по методу наименьших квадратов координат пунктов и высот в некоторой существующей МСК с реконструированными координатами и высотами, полученными из последовательного, полностью ограниченного уравнивания каждого исходного пункта сети, в процессе итераций. Фактически — это требование, которое постулируется в документе [1], с одной стороны, а с другой — существуют признанные способы [2] создания «калибровочных участков», которые в спутниковых технологиях не вызывают каких-либо возражений при их практическом применении. Тем не менее, результат может быть достаточно похожим, но реализация построена на ином принципе. Способ итераций малочувствителен к ошибкам координат и высот исходных пунктов, прост, нагляден и универсален. Критерием окончания итерационного процесса является некоторая малая, близкая к нулю скалярная величина  $\epsilon$ , с которой идет сравнение максимальной из средних квадратических погрешностей (СКП), вычисляемых по приращениям оцениваемых координат и высот для исходных пунктов в МСК на каждой текущей итерации.

Реконструированная система координат и высот может быть осознанно экстраполирована, т. е. распространена на большую территорию, чем та, в

**Изменение приращений абсцисс ПДБС в СК-42 в процессе итераций (в миллиметрах)**

**Таблица 1**

Название ПДБС	Номер итерации						
	1	2	3	4	5	6	7
BARA	59	15	8	3	2	0	2
BOLO	-71	72	-7	11	-1	1	1
CHER	158	51	-2	10	-2	2	2
CHUL	152	-70	9	-9	0	-1	-1
DOVO	-357	98	-9	11	0	2	3
ISKT	-16	18	-4	1	-1	0	0
KARG	271	-16	15	3	4	-1	2
KOCH	-335	-31	-32	-13	-4	-3	-3
KOCK	23	-29	-9	0	-4	1	0
KOLV	-434	5	-49	4	-8	1	-1
KRAS	127	-49	36	-14	9	-3	0
MASL	429	-85	58	-11	10	-2	0
mhkv	-175	-2	-22	2	-2	-1	-1
NSKW	-64	-204	1	-29	-1	-4	-6
ORDN	-68	13	-39	3	-8	0	-1
SUZU	65	-5	22	-6	5	-2	0
TOGU	132	70	11	13	0	3	3
UBIN	213	-22	35	3	4	2	3
ZDVI	-148	104	-20	17	-2	3	3
Максимальные отклонения	-434	-204	-49	-29	-8	-4	-6
Среднее	-2	-4	0	0	0	0	0
СКП	222	72	27	11	5	2	2

пределах которой она была обработана. Результаты реконструкции по способу итераций могут быть прокалиброваны на том же уровне точности, с какой выполнены спутниковые измерения для пунктов искомой геодезической сети. Сама же процедура калибровки после высокоточной реконструкции становится тривиальным техническим инструментом для перехода из общеземной системы в систему координат пользователя.

Способ итераций был апробирован на первой очереди спутниковой геодезической сети Новосибирской области, состоящей из 19 ПДБС, с целью высокоточной реконструкции их координат в СК-95, СК-42 и высот в Балтийской системе высот 1977 г. (БСВ-77). Более подробно особенности построения данной сети рассмотрены в публикациях [3, 4]. Формирование предварительных каталогов координат и высот ПДБС осуществлялось по результатам спутниковых измерений радиальным способом из геодезической привязки к ближним (в среднем к десяти) пунктам ГГС. СКП привязки ПДБС из уравнивания по внутренней сходимости составила в среднем 0,025–0,030 м как по координатам в СК-42 и СК-95, так и по высоте в БСВ-77 [4, 5]. С целью оценки точности спутниковой сети в целом было выполнено полностью ограниченное уравнивание координат ПДБС в СК-42 и СК-95. При этом координаты и высоты всех 19 ПДБС, полученные из геодезической привязки, были зафиксированы в качестве исходных. Были получены следующие результаты: СКП центрирования и измерения высоты антенны (аналог СКП единицы веса) в СК-42 составили 0,22 м, в СК-95 — 0,035 м как в плане, так и по высоте. Камеральная

обработка спутниковых измерений проводилась в программе Trimble Business Center.

На следующем этапе по способу итераций выполнялась высокоточная реконструкция координат спутниковой геодезической сети в СК-42, СК-95 и БСВ-77. Начальными (исходными) координатами для всех 19 ПДБС служили результаты их геодезической привязки к пунктам ГГС. В качестве примера и иллюстрации динамики итерационного процесса в табл. 1 и 2 приведены значения приращений абсцисс и ординат в СК-42. Как видно из этих таблиц, итерационный процесс фактически стабилизировался на 6–7 итерациях. СКП абсцисс и ординат достигли своих асимптотических пределов в

плане на уровне 2 мм и 4 мм, а по высоте — 3 мм. Аналогичный процесс в СК-95 завершился уже на 4-й итерации со значениями СКП в плане 3 мм и 2 мм и по высоте 5 мм.

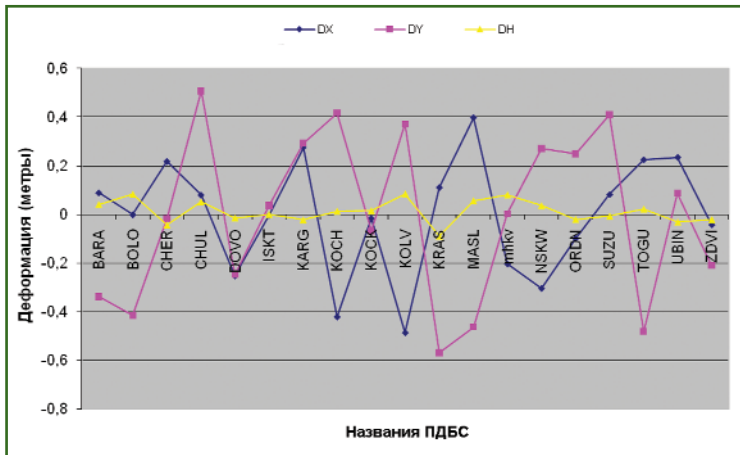
Окончательные отклонения (деформации) координат и высот из геодезической привязки относительно реконструированных значений в СК-42, СК-95 и БСВ-77 приведены на рис. 2 и 3. Анализ полученных результатов реконструкции по способу итераций позволяет сделать вывод о том, что исследуемая сеть в СК-95 в 5–10 раз точнее, чем в СК-42.

Далее была сделана проверка утверждения о том, что реконструированные с высокой точностью координаты пунктов могут быть взаимно преобразо-

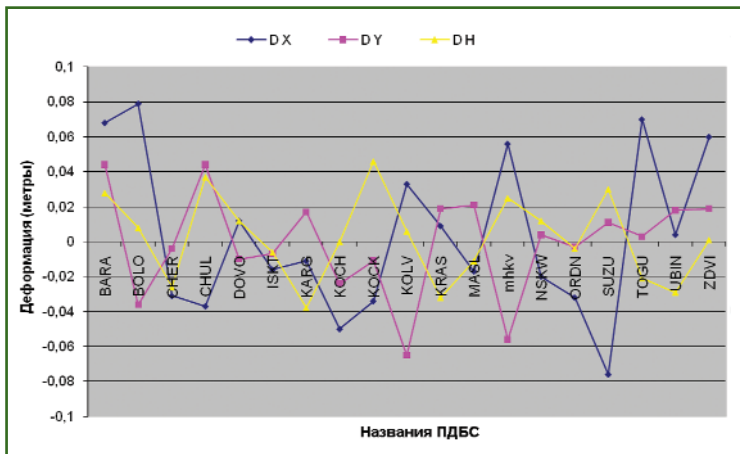
Изменение приращений ординат ПДБС в СК-42 в процессе итераций (в миллиметрах)

Таблица 2

Название ПДБС	Номер итерации						
	1	2	3	4	5	6	7
BARA	-315	56	-111	35	-26	10	3
BOLO	-426	90	-98	37	-25	9	1
CHER	36	-68	31	-22	12	-7	-2
CHUL	489	-34	47	-12	13	-4	1
DOVO	-216	-14	-18	-6	0	-2	-2
ISKT	52	-4	-10	0	0	-1	0
KARG	287	59	-85	38	-24	10	3
KOCH	232	111	38	25	0	7	6
KOCK	-223	106	35	-3	14	-3	2
KOLV	284	63	18	0	6	-2	1
KRAS	-668	135	-69	34	-17	9	4
MASL	-428	29	-52	-2	-10	2	-2
mhkv	125	-139	40	-25	6	-4	-3
NSKW	58	163	18	25	3	3	5
ORDN	123	59	41	15	5	4	5
SUZU	467	-80	21	-3	0	2	1
TOGU	-337	-96	-20	-22	0	-5	-4
UBIN	352	-250	38	-69	20	-15	-9
ZDVI	-76	-109	-11	-25	6	-8	-5
Максимальные отклонения	-668	-250	-111	-69	-26	-15	-9
Среднее	489	163	47	38	20	10	6
СКП	-10	4	-8	1	-1	0	0
	330	107	52	28	14	7	4



**Рис. 2**  
Деформации координат и высот ПДБС в СК–42



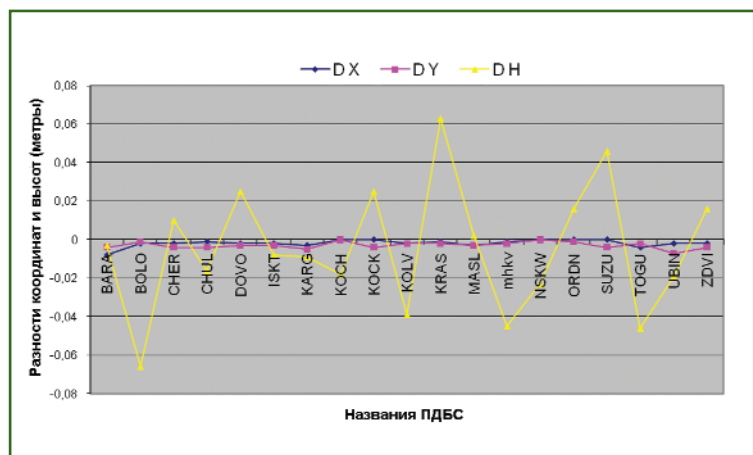
**Рис. 3**  
Деформации координат и высот ПДБС в СК–95

ваны из одной системы координат в другую без потери точности. С этой целью для двух вариантов высокоточной реконструкции координат ПДБС в СК–95 и в СК–42 был создан ключ взаимного преобразования координат. Так как в каждом из вариантов наряду с плановыми координатами участвовали и нормальные высоты, полученные из геодезической привязки ПДБС к пунктам ГГС, то в ключ было включено и преобразование по нормальным высотам (значения высот в вариантах привязки ПДБС имели некоторые несовпадения, из-за отличий в составе исходных пунктов ГГС). Затем по ключу было сделано преобразование координат ПДБС из СК–95 в

СК–42 и высот в БСВ–77. Результаты представлены в виде графиков на рис. 4.

Как следует из анализа данных, отображенных на рис. 4, разности абсцисс и ординат имеют систематический характер (все имеют знак минус), максимальные значения разностей достигают 7–8 мм, а СКП для всей выборки составляет 2 мм. Таким образом, точность пересчета координат по ключу соответствует точности исходных реконструированных координат, что и требовалось показать. По высоте результат получился на порядок грубее: амплитуда разностей составила ±65 мм, а СКП по всей выборке равна 33 мм. Можно сделать вывод, что точность реконструированной сети по высоте практически осталась на уровне точности геодезической привязки, как и до реконструкции. Вероятной причиной, очевидно, является плохая геометрия (обусловленность) сети по высоте в процессе уравнивания, что требует проведения дополнительных исследований.

Результаты, полученные из высокоточной реконструкции сети ПДБС по способу итераций, позволяют построить вариант некоторой эталонной системы координат по сравнению с исходной. И с этой точки зрения, реконструированные



**Рис. 4**  
Разности между координатами и высотами ПДБС, полученными по ключу преобразования из СК–95 в СК–42, и реконструированными координатами в СК–42 и высотами в БСВ–77



