

# ТЕХНОЛОГИЯ RTPK КОМПАНИИ JAVAD GNSS

## Джавад Ашджае (Javad Ashjaee) (1949–2020)

В 1976 г. получил степень магистра математики и электроники, затем — степень доктора электроники в университете штата Айова (США). Работал в компании Trimble. В 1987 г. основал компанию Ashtech, а в 1998 г. — компанию Javad Positioning Systems. С 2007 г. по 2020 г. - президент компании JAVAD GNSS.

## А.И. Разумовский (JAVAD GNSS)

В 1978 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «астрономо-геодезия», а в 1988 г. — факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности «прикладная математика». После окончания МИИГАиК работал в ЦНИИГАиК, с 1994 г. — в компании Ashtech, с 1996 г. — в Институте точной механики и вычислительной техники им. С.А. Лебедева РАН. С 2007 г. работает в компании JAVAD GNSS, в настоящее время — руководитель группы постобработки ГНСС измерений и ГИС. Кандидат технических наук.

Технология вычисления координат в квазиреальном времени, основанная на постобработке данных, была разработана в 2020 г. основателем компании JAVAD GNSS доктором Джавадом Ашджае и получила название Real Time Post processed Kinematic (RTPK). В 2021 г. технология RTPK была запатентована в США.

Основные особенности RTPK: — используются данные, полученные в режиме RTK;

— постобработка выполняется спутниковым приемником;

— проводится верификация (проверка) фиксированного решения.

Для постобработки с помощью RTPK необходимы данные спутниковых измерений на базовой станции, передаваемые в формате RTCM 3, которые сохраняются в файле подвижного приемника (ровера). В ГНСС-приемниках компании JAVAD GNSS такая возможность предусмотрена.

Вычисления выполняются на процессоре RISC-архитектуры, который одновременно обрабатывает спутниковые сигналы, поддерживает связь с базовой

станцией и работу в режиме RTK.

Алгоритм обработки аналогичен тому, что применяется Интернет-сервисе DPOS компании JAVAD GNSS, хорошо зарекомендовавшем себя в США за 7 лет работы. Количество обращений к сервису на обработку превышает 100 000 в месяц.

Рассматриваемый в статье метод RTPK уже получил заслуженное признание у сотен вос-

пользовавшихся им американских геодезистов. С одним из таких отзывов можно ознакомиться на открытом форуме компании JAVAD GNSS — <http://support.javad.com> (рис. 1).

### ▼ Современные проблемы метода RTK

Основной проблемой работы в RTK является проверка достоверности фиксированного решения. С развитием новых гло-

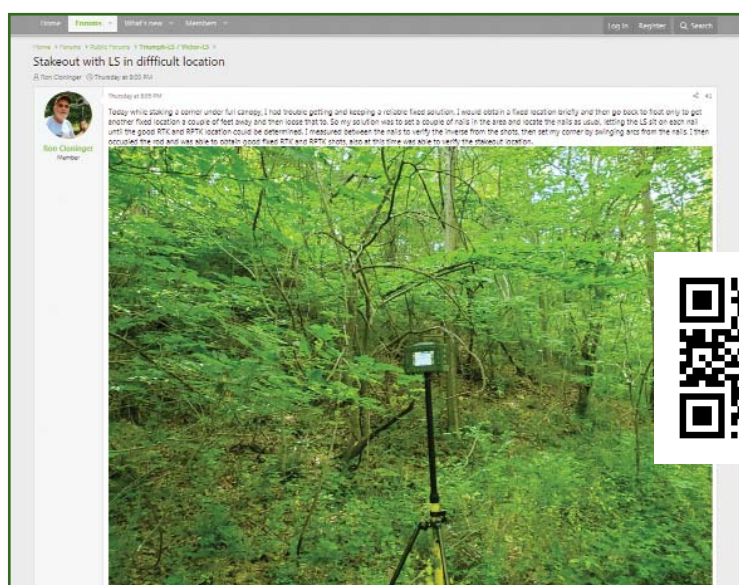


Рис. 1

Отзыв Рона Клонингера (Ron Cloninger) о применении метода RTPK на форуме компании JAVAD GNSS

бальных навигационных спутниковых систем появились дополнительные возможности ее преодоления. В большинстве алгоритмов поиска целочисленных значений фазовых неоднозначностей основным критерием является контраст — отношение сумм квадратов невязок двух наилучших целочисленных вариантов. В не столь отдаленные времена, когда были доступны сигналы только GPS и ГЛОНАСС, последовательный перебор целочисленных значений быстро приводил или к предустановленному эмпирическому значению контраста, или к полному исчерпанию возможных вариантов. Ситуация резко изменилась с появлением новых группировок ГНСС, таких как Galileo, Beidou, QZSS. При одновременном наблюдении большого количества спутников, передающих сигналы в трех диапазонах, критически возросла вероятность случайного выбора недостоверных данных, которые, тем не менее, в совокупности удовлетворяют критериям фиксированного решения.

Практика работы в RTK показала, что однократные измерения не гарантируют достоверность решения. Оценка точности вычислений координат обоснована только в случае безошибочной инициализации фазовых измерений. Однако критерии средней квадратической погрешности или геометрического фактора (PDOP) не являются содержательными для проверки достоверности фиксации неоднозначностей.

В большинстве случаев исполнитель вынужден неоднократно повторять определения координат одной и той же точки. Модификациями повторных результатов через определенные интервалы времени являются измерения с измененной высотой антенны или измерения на дополнительных точ-

ках с контрольными промерами расстояний между ними с помощью рулетки. Естественно, это приводит к потере времени.

Какие решения предлагают производители ГНСС-оборудования? Один из наиболее популярных вариантов — раздельная обработка сигналов спутниковых систем или их произвольных комбинаций. Полученные независимые решения сравниваются по значениям координат на предмет их соответствия, устанавливаемого на основе оценки точности. При удовлетворении допусков окончательное решение вычисляется как средневзвешенное. Указанный многопоточный подход уменьшает вычислительные нагрузки, что позволяет применять его на менее мощных процессорах. Одновременно увеличивается достоверность решения.

Раздельная обработка данных имеет существенные недостатки. Во-первых, неясно по каким критериям следует комбинировать сигналы ГНСС: GPS + ГЛОНАСС, Galileo + Beidou и т. д. Актуальность комбинаций может существенно изменяться в связи с непрерывным развитием ГНСС. Во-вторых, еще более важным недостатком раздельной обработки является ослабление так называемого плавающего решения в связи с ухудшением геометрического фактора. Фиксированное решение вычисляется на основе плавающего, которое включает как координаты, так и неоднозначности. При этом координаты не являются целью плавающего решения. Такой целью является ковариационная матрица и величины неоднозначностей, но поскольку имеется корреляция параметров, то возможности фиксации будут также зависеть от точности предварительных координат. Указанная точность координат, в свою очередь, зависит от количества спутни-

ков, использованных в конкретном решении, и геометрии их расположения на небосводе. Иначе говоря, от геометрического фактора, который принято называть PDOP.

Известно, что алгоритмы RTK основаны на однонаправленной фильтрации данных. Каждая новая эпоха измерений может являться основанием для инициализации фазовых измерений или уточнения координат. Критерий получения фиксированного решения основан, в первую очередь, на значении контраста, который вычисляется на коротком временном окне. Благодаря такому подходу можно выполнить быструю инициализацию фазовых измерений и далее, сохраняя фиксированное решение, уточнять его с каждой новой эпохой. Традиционно при постобработке не применяется такой подход, поэтому до настоящего времени метод RTK был предпочтителен для работы в сложных условиях. Анализ набора данных полной сессии наблюдений, выполненных в неблагоприятных условиях, требует значительного количества итераций с целью отбраковки недостоверных измерений, которых может быть слишком много для достижения результата вычислений за приемлемое время. Поэтому постобработка часто не дает результата даже при продолжительных сессиях наблюдений.

Алгоритмы фильтрации имеют множество эмпирических параметров, которые являются настройками обработки — веса кодовых и фазовых измерений, временной фактор уменьшения веса прошедших эпох, оценка случайного шума системы, блиндирование сигналов по углу восхождений и азимуту и т. д. Путем настройки параметров с помощью тех же алгоритмов RTK при постобработке можно добиться значительно

более лучших результатов, чем в режиме реального времени.

▼ **Преимущества метода RTPK**

RTPK использует преимущества как постобработки, так и RTK. Двухнаправленный алгоритм фильтрации не только предоставляет дополнительные возможности для инициализации фазовых измерений — получения так называемого фиксированного решения, но и увеличивает количество эпох, используемых для вычисления координат.

Все имеющиеся сигналы ГНСС обрабатываются совместно, обеспечивая максимальное значение PDOP.

В случае применения RTPK нет необходимости выполнять повторные наблюдения на одной и той же точке. Параметры фильтрации устанавливаются на основании предварительной проверки статистических гипотез, выполняемой на полном ряде наблюдений. Верификация целочисленного решения проводится внутри оригинального алгоритма обработки ковариационной матрицы плавающего решения путем сопоставления так называемых частичных решений еще на этапе обработки ковариационной матрицы. Достоверность вычисленных координат будет лучше, чем при использовании метода RTK.

Время постобработки данных в различных ГНСС-приемниках компании JAVAD GNSS составляет примерно 1/20–1/60 от времени наблюдений. Рекомендуемое время наблюдений в экстремальных условиях при полностью «закрытом небосводе» равно 6 минутам. Если условия наблюдений хорошие, то достаточно 5–6 секунд. Таким образом, будет справедливо утверждение, что RTPK является квази-RTK методом, поскольку обработка данных занимает в большинстве случаев порядка одной секунды.

В случае потери радиосигнала, передающего поправки, предусмотрена возможность скачать файл измерений, полученных на базовой станции, на подвижный приемник и получить решение непосредственно в полевых условиях. Во многих случаях это может быть очень полезно.

Применение полной калибровочной таблицы антенны, учитывающей не только зависимость от угла восхождения спутника, но и от азимута, значительно повышает точность вычисления вертикальной компоненты решения. Обычное расхождение решений на расстоянии до 15 км при нормаль-

ных условиях составляет 1–2 мм по всем трем координатам.

▼ **Пример сравнения RTK и RTPK в сложных условиях**

В данном испытании ГНСС-приемник TRIUMPH-LS был установлен у стены кирпичного дома, окруженного многолетними деревьями (рис. 2). Вследствие сильной многолучевости условия наблюдения в таком месте были хуже, чем даже непосредственно под кронами деревьев. Приемник принимал сигналы GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou, QZSS. Каждые 2 минуты автоматически записывались решения RTK и RTPK.

Статистика измерений в RTK (рис. 3) и в RTPK (рис. 4) пока-

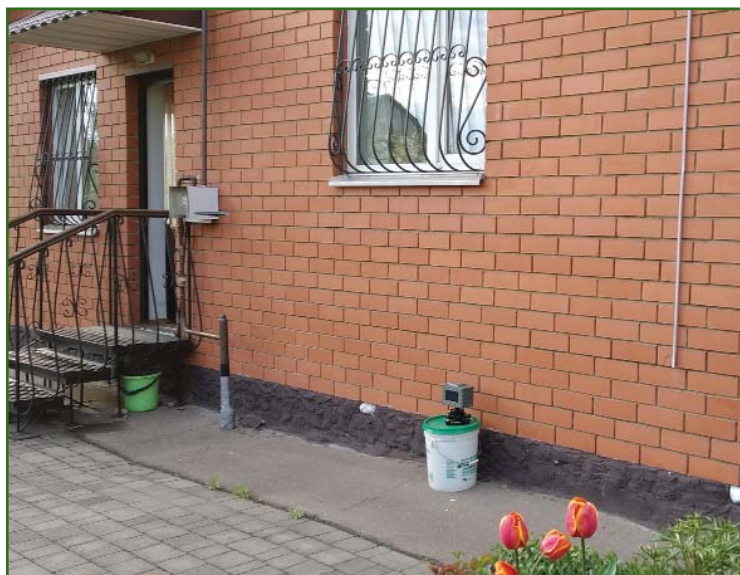


Рис. 2  
Расположение ГНСС-приемника TRIUMPH-LS во время испытания

Averaging		Horizontal Percentiles		Vertical Percentiles	
Points	61	100%	2.74m	100%	4.65m
Distance	10.7cm	99%	54.0cm	99%	42.2cm
HRMS	10.8mm	95%	52.0cm	95%	34.7cm
VRMS	12.3mm	90%	82.8mm	90%	10.4cm
GPS	5.4	85%	74.5mm	85%	70.8mm
GLO	1.4	80%	54.7mm	80%	62.0mm
Galileo	2.9	75%	48.3mm	75%	56.5mm
BeiDou	4.1	68%	39.8mm	68%	44.6mm
QZSS	0.0	50%	27.7mm	50%	29.2mm
Per Point	95.26 sec				

Рис. 3  
Статистика результатов измерений в режиме RTK: 60 плавающих решений, 16 «отлетов» («отлет» — отклонение от точного значения на 3 см)



Averaging		Horizontal Percentiles		Vertical Percentiles	
Points	116	100%	2.93m	100%	3.05m
Distance	11.3cm	99%	1.43m	99%	1.62m
HRMS	8.2mm	95%	26.9cm	95%	30.7cm
VRMS	9.0mm	90%	70.1mm	90%	96.5mm
GPS	6.1	85%	54.8mm	85%	75.7mm
GLO	4.9	80%	45.7mm	80%	63.0mm
Galileo	4.5	75%	35.4mm	75%	50.5mm
BeiDou	7.2	68%	32.8mm	68%	39.3mm
QZSS	0.0	50%	25.8mm	50%	20.6mm
Per Point	117.93 sec				

Рис. 4

Статистика результатов измерений методом RTPK (5 плавающих решений, 23 «отлета»)

зывает, что использование метода RTK позволило получить 45 точных решений, а RTPK — 93 точных решения. Таким образом, эффективность RTPK оказалась выше в 2 раза.

Настройки ГНСС-приемника TRIUMPH-LS позволяют сравнивать оба решения и при их совпадении автоматически записывать результат (рис. 5). Как показали испытания, такой подход обеспечивает высокую надежность фиксированного решения (свыше 99,99%).

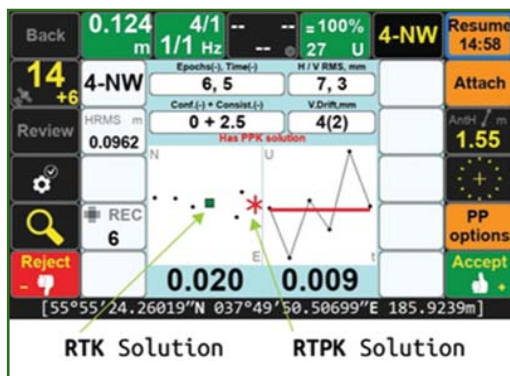


Рис. 5

Пример отображения на экране ГНСС-приемника TRIUMPH-LS результатов сравнения решений RTK и RTPK

▼ **Обработка длинных базисных линий**

Расширенное моделирование тропосферного эффекта, возможное только при постобработке, позволяет выполнять надежные определения координат на больших расстояниях от

базовой станции, тогда как обычный RTK нельзя рекомендовать при удалении от базовой станции свыше 40 км.

На рис. 6 приведена статистика результатов обработки линий длиной 25, 36, 56 км по единичным независимым эпохам в RTPK. Использовались спутники GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, QZSS. Полные сессии наблюдений составляли 4 часа. Было выполнено 14 401 вычисление.

Horizontal Percentiles		Vertical Percentiles	
100%	37.9mm	100%	13.8cm
99%	13.9mm	99%	22.9mm
95%	10.8mm	95%	17.0mm
90%	9.1mm	90%	14.3mm
85%	8.1mm	85%	12.5mm
80%	7.2mm	80%	11.2mm
75%	6.4mm	75%	10.2mm
68%	5.8mm	68%	8.9mm
50%	4.2mm	50%	6.1mm

Длина линии 25 км, количество «отлетов» - 0 (0%)

Horizontal Percentiles		Vertical Percentiles	
100%	10.3cm	100%	20.1cm
99%	28.3mm	99%	54.4mm
95%	18.0mm	95%	37.4mm
90%	15.0mm	90%	30.0mm
85%	13.6mm	85%	25.2mm
80%	12.4mm	80%	22.1mm
75%	11.4mm	75%	19.6mm
68%	10.3mm	68%	16.8mm
50%	8.1mm	50%	11.4mm

Длина линии 36 км, количество «отлетов» - 61 (0,4%)

Horizontal Percentiles		Vertical Percentiles	
100%	3.84m	100%	6.90m
99%	68.9mm	99%	67.2mm
95%	26.4mm	95%	37.9mm
90%	19.4mm	90%	30.2mm
85%	16.5mm	85%	25.7mm
80%	14.9mm	80%	22.5mm
75%	13.4mm	75%	20.0mm
68%	12.0mm	68%	17.2mm
50%	9.0mm	50%	11.4mm

Длина линии 36 км, количество «отлетов» - 280 (1,9%)

Рис. 6

Статистика измерений в RTPK для разных длин линий