Сравнение шести ГНСС-антенн по данным RINEX

Отчёт по анализу наблюдений 09.10.2026, 12:00–13:00 GPS (DOY 282)

Антенны: 800S, G3-AI, AR20, AS10, CR-G3, ZEPHYR | Дата отчёта: 04.11.2026

1. Цель и краткие выводы



Цель работы — сравнить шесть ГНСС-антенн, установленных на одной площадке и подключённых к одинаковым приёмникам, по качеству принимаемых сигналов, чувствительности на низких углах, многолучёвости, шуму фазы, а также оценить взаимные смещения и вариации фазовых центров (PCV). Полные названия антенн далее идут в сокращениях:

1. Leica AR20 GNSS Choke Ring antenna.
2. Topcon CR-G3 GNSS Choke Ring antenna
3. Trimble ZEPHYR GEODETIC 2.
4. Leica AS10.
5. Topcon G3-AI.
6.Beitian 800s.

- **Данные полные и сопоставимые.** Во всех шести файлах 3600 эпох из 3600, пропусков нет, набор сигналов одинаков. Различия между станциями отражают свойства антенн и места установки, а не качество потока.

- **Шум фазы одинаков у всех антенн:** 1.5–2.5 мм на L1/E1/B1I и 3.3–5.0 мм на GPS L2W. Для выбора антенны эта метрика не информативна.
- **Главное различие — диаграмма усиления по углу возвышения.** AR20 слабее среднего на 1.2–1.7 дБ·Гц у горизонта и сильнее на 1.8 в зените (L1). CR-G3 сильнее среднего на 1.3 –1.4 дБ·Гц выше 45°. ZEPHYR слабее на L1 на всех углах (до −2.4 дБ·Гц в зените). G3-AI и AS10 сильнее среднего у горизонта.
- **Чувствительность на низких спутниках.** Лучше всех AS10 (пропуск 6.0% спутников на 5–10°, 1.2% на 10–20°) и G3-AI (7.2% и 2.7%). AR20 теряет 22.3% спутников на 5–10°.
- **Многолучёвость кода.** AR20 лучше всех выше 30°: 0.34 м на 45–60° и 0.21 м на 60–90° против 0.31–0.66 м у остальных. Ниже 30° антенны практически неразличимы.
- **Смещения фазовых центров определены:** антенны расположены в пределах 1.8 м по оси восток–запад и 1.2 м по оси север–юг, расстояния между парами 0.76–1.93 м, точность ±3–6 см. **PCV различаются на 2–4 мм (RMS)**, что на уровне погрешности метода (3–4 мм), то есть достоверно не разрешено.
- **Азимутальная аномалия.** В секторе 180–225° на возвышениях 15–60° G3-AI и ZEPHYR принимают на 1.9–2.1 дБ·Гц слабее среднего, а AR20 и CR-G3 на 2.5 сильнее. Эффект повторяется у спутников четырёх систем, причина — локальное затенение и/или отражение на площадке.

2. Исходные данные и допущения

Таблица 1. Исходные файлы и принятые обозначения антенн

Обозначение в отчёте	Исходный файл	Примечание
800S	800S28212_26o.gz	
G3-AI	ANTCOM28212_26o.gz	
AR20	AR2028212_26o.gz	
AS10	AS1028212_26o.gz	
CR-G3	TOPCON28212_26o.gz	
ZEPHYR	ZEPHYR28212_26o.gz	

- Формат: RINEX 3.03, 1 Гц, период 12:00:00–12:59:59 GPS 09.10.2026, 3600 эпох в каждом файле. Системы: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. Перед каждой эпохой записан служебный комментарий DELAY (задержка потока).
- Навигационные данные: эфемериды из файлов le20282m.26n/.26g/.26l/.26f (RINEX 3.04, GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou).
- Допущения: все антенны стоят на одной площадке, приёмники и тракты одинаковые. Позиция для расчёта углов — приблизительные координаты G3-AI из заголовка (около 56.2° с. ш., 37.5° в. д.). Для антенн на расстоянии до 2 м этого достаточно.

3. Методика

- **Положения спутников.** GPS, Galileo, BeiDou (включая GEO) — по кеплеровским эфемеридам; ГЛОНАСС — численным интегрированием (метод Рунге–Кутты 4-го порядка). Проверка по псевдодальностям: после учёта часов спутников робастный разброс невязок 14–24 м (без поправок на ионосферу и тропосферу); все наблюдаемые спутники выше 5°, что соответствует маске приёмника.

- **Сравнение SNR.** Для каждой антенны вычислено отклонение от среднего по шести антеннам на одних и тех же спутниках и эпохах, по диапазонам углов возвышения. L1-диапазон: GPS L1C, ГЛОНАСС G1, Galileo E1, BeiDou B1C и B1I; L2/L5-диапазон: GPS L2W и L5Q, ГЛОНАСС G2, Galileo E5a и E5b, BeiDou B2a и B3I.
- **Чувствительность.** Доля спутников, которые отслеживают минимум 4 из 5 остальных антенн, но не данная (по сигналам L1-диапазона).
- **Многолучёвость (MP).** Комбинация кода с двумя фазами; из каждой непрерывной дуги длиной от 120 с вычтено среднее; RMS по возвышению (GPS L1/L2 и L1/L5, Galileo E1/E5a, BeiDou B1I/B3I).
- **Шум фазы и срывы.** Шум за 1 с — по разностям между антеннами (робастная оценка, метод наименьших квадратов по 15 парам). Флагов потери захвата (LLI) в файлах нет, поэтому срывы определялись по скачкам геометрически свободной комбинации фаз больше 10 см между соседними эпохами.
- **Смещения и PCV.** Одинарные разности фазы по общим спутникам; часы приёмников исключены отдельно для каждой эпохи и созвездия, неоднозначности — для каждой дуги. Оцениваются смещение фазового центра (E, N, U) и PCV как кусочно-линейная функция возвышения с узлами 5–90°; после оценки вычтено точечное смещение. Результаты нормированы к среднему по группе, пары получены разностью. Для L1 объединены GPS L1C, Galileo E1 и BeiDou B1C, для L5 — GPS L5Q, Galileo E5a и BeiDou B2a.

4. Результаты

4.1 Полнота данных и состав спутников

Таблица 2. Полнота данных и число спутников в эпоху (среднее)

Антенна	Эпох	Всего	GPS	ГЛОНАСС	Galileo	BeiDou	Уник. спутн.	Не отслеживает
800S	3600	37.6	10.4	8.0	10.6	8.7	48	C02, C07, C20
G3-AI	3600	38.0	10.4	7.9	10.8	8.9	50	C07
AR20	3600	38.0	10.2	7.9	10.2	9.7	51	—
AS10	3600	38.8	10.3	8.1	10.5	10.0	51	—
CR-G3	3600	38.5	10.3	8.1	10.3	9.8	50	C07
ZEPHYR	3600	37.2	10.3	8.0	10.1	8.7	50	G24

Всего в шести файлах наблюдалось 51 спутник. AR20 и AS10 отслеживают все 51, CR-G3 и G3-AI не видят C07, ZEPHYR — G24, 800S — C02, C07 и C20. Основное различие по числу спутников — BeiDou: 9.7–10.0 в эпоху у AR20, AS10 и CR-G3 против 8.7–8.9 у 800S, G3-AI и ZEPHYR. Служебная задержка потока (DELAY) близка у всех: медиана 241–251 (в единицах файла, вероятно мс), 95-й перцентиль около 300–306; у CR-G3 хвост тяжелее: 95-й перцентиль 408, максимум 825 (у остальных 553–665).

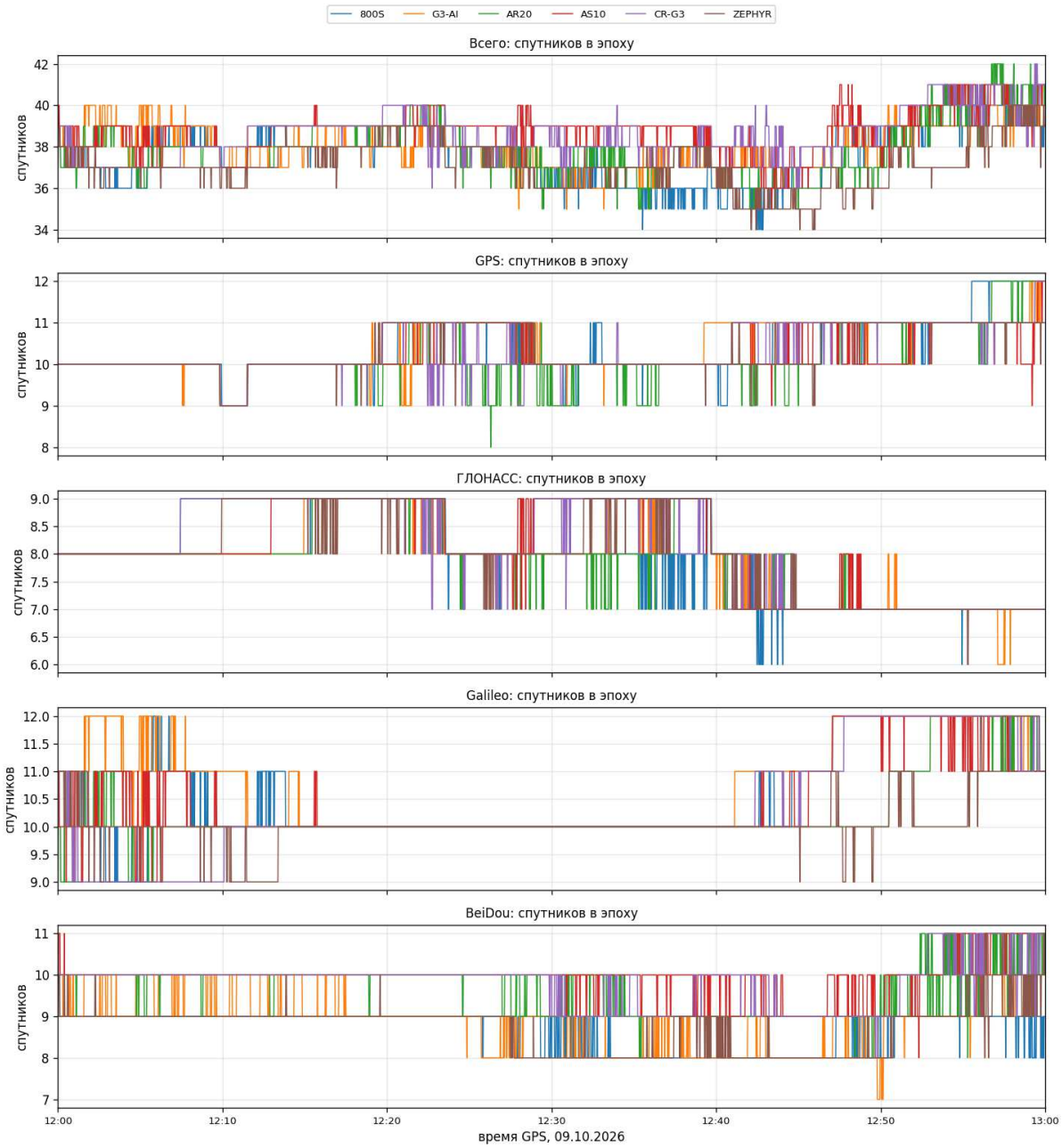


Рисунок 1. *Число спутников в эпоху по созвездиям для шести антенн.*

4.2 Уровень сигнала (SNR)

На графике среднего SNR по времени ZEPHYR стабильно ниже остальных на L1 у GPS, ГЛОНАСС и Galileo, на BeiDou B1I различий почти нет.



Рисунок 2. *Средний SNR по спутникам в L1-диапазоне (сглаживание 30 с).*

Таблица 3. Средний SNR (дБ·Гц) по углу возвышения, L1-диапазон, одинаковые спутники и эпохи

Угол	800S	G3-AI	AR20	AS10	CR-G3	ZEPHYR
5–10°	33.9	34.0	31.4	34.3	32.7	32.5
10–20°	36.0	37.0	34.5	36.6	36.0	35.1
20–30°	39.8	40.2	38.2	40.0	39.6	38.4
30–45°	41.7	42.3	42.5	42.5	43.0	41.2
45–60°	42.9	42.5	44.9	43.2	44.7	41.8
60–90°	46.5	46.2	48.6	47.1	48.1	44.4

Зелёным выделен максимум, оранжевым — минимум в строке.

Таблица 4. Отклонение SNR от среднего по шести антеннам (дБ·Гц)

Диапазон, угол	800S	G3-AI	AR20	AS10	CR-G3	ZEPHYR
L1, 5–10°	+0.77	+0.87	−1.74	+1.18	−0.48	−0.61
L1, 10–20°	+0.10	+1.15	−1.40	+0.75	+0.17	−0.77
L1, 20–30°	+0.41	+0.85	−1.15	+0.68	+0.21	−1.01
L1, 30–45°	−0.50	+0.08	+0.31	+0.33	+0.76	−0.98
L1, 45–60°	−0.41	−0.84	+1.53	−0.11	+1.39	−1.56
L1, 60–90°	−0.28	−0.61	+1.76	+0.26	+1.30	−2.43

Диапазон, угол	800S	G3-AI	AR20	AS10	CR-G3	ZEPHYR
L2/L5, 5–10°	+1.64	+1.31	+0.12	−0.09	−2.15	−0.84
L2/L5, 10–20°	+1.53	+0.64	+0.19	+0.57	−2.25	−0.69
L2/L5, 20–30°	+1.30	+0.59	−0.28	+0.87	−1.93	−0.55
L2/L5, 30–45°	+0.14	−0.12	+0.69	+0.30	−0.76	−0.25
L2/L5, 45–60°	+0.11	−0.63	+1.53	−0.96	+0.29	−0.34
L2/L5, 60–90°	−0.32	−0.47	+1.54	−1.39	+0.74	−0.11

- **AR20** — «зенитная» диаграмма: −1.74…−1.15 дБ·Гц до 30° и +1.76 в зените (L1), +1.5 в зените на L2/L5.
- **CR-G3** — на L1 выше среднего с 30° (+0.76 на 30–45°, +1.3…+1.4 выше 45°), но на L2/L5 при углах до 30° слабее среднего на 1.9–2.3 дБ·Гц.
- **ZEPHYR** — слабее среднего на L1 на всех углах (−0.6 у горизонта, −2.4 в зените); на L2/L5 близок к среднему (−0.1…−0.8).
- **G3-AI** и **AS10** — выше среднего на низких углах (+0.9…+1.2 на L1 до 30°); в зените на L1 у G3-AI −0.6, на L2/L5 у AS10 −1.4.
- **800S** — на L1 близок к среднему, на L2/L5 лучше всех на углах до 30° (+1.3…+1.6).

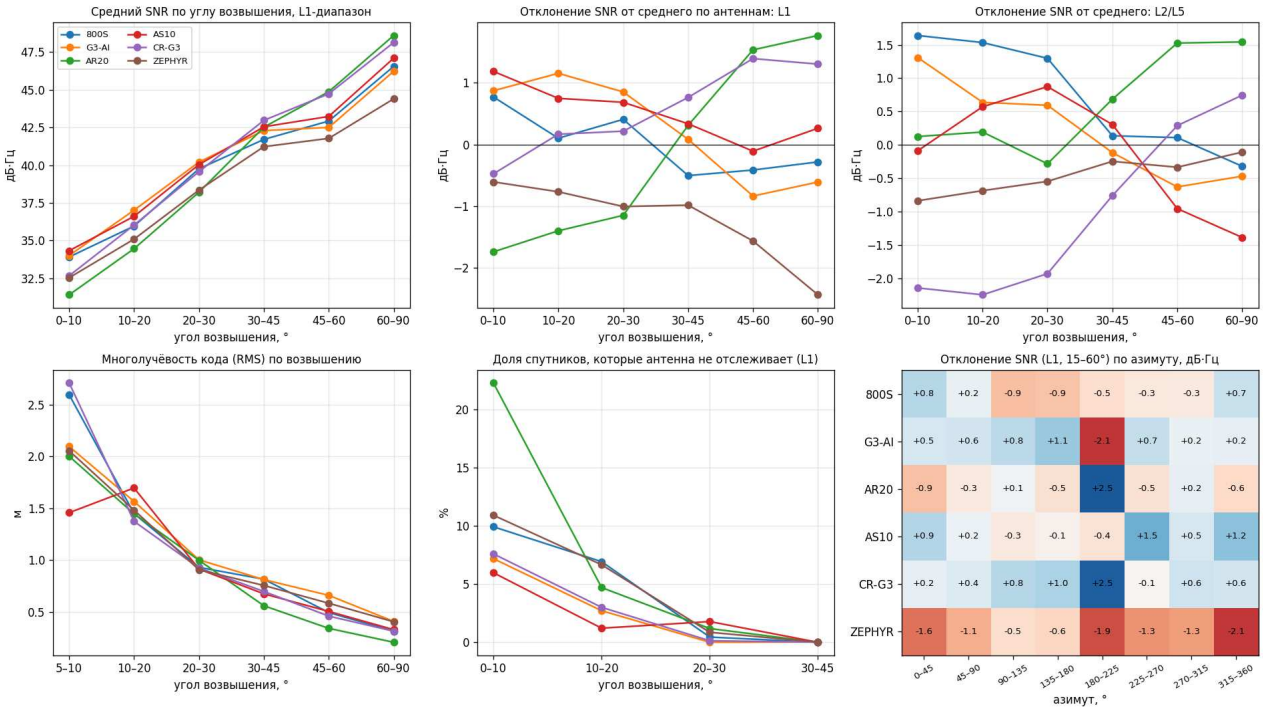


Рисунок 3. *Сводка по углам возвышения: SNR, отклонение SNR (L1 и L2/L5), многолучёвость кода, пропуск спутников и отклонение SNR по азимуту.*



Рисунок 4. *Отклонение SNR антенн от среднего по сигналам (одинаковые спутники и эпохи).*

4.3 Чувствительность на низких углах

Таблица 5. Доля спутников, которые антенна не отслеживает, а остальные видят (%), L1-диапазон

Угол	800S	G3-AI	AR20	AS10	CR-G3	ZEPHYR
5–10°	9.9	7.2	22.3	6.0	7.6	10.9
10–20°	6.9	2.7	4.7	1.2	3.0	6.7
20–30°	0.4	0.0	1.2	1.8	0.1	0.9
30–45°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Выше 45° пропуски практически отсутствуют (0–0.3%). Выделены лучшее и худшее значения для первых двух строк.

AR20 практически не отслеживает спутники ниже 7°, что согласуется с зенитной диаграммой усиления. Лучшую чувствительность на низких углах показывают AS10 и G3-AI. Для задач, где важны низкие спутники (городская застройка, лес), это существенное преимущество.

4.4 Многолучёвость кода

Таблица 6. RMS многолучёвости кода (м) по углу возвышения

Угол	800S	G3-AI	AR20	AS10	CR-G3	ZEPHYR
5–10°	2.60	2.10	2.00	1.46	2.71	2.05
10–20°	1.45	1.57	1.45	1.70	1.37	1.48
20–30°	0.93	1.00	1.00	0.91	0.92	0.91
30–45°	0.82	0.81	0.56	0.67	0.70	0.76
45–60°	0.49	0.66	0.34	0.50	0.46	0.58
60–90°	0.31	0.41	0.21	0.33	0.31	0.40

Зелёным выделено лучшее значение, оранжевым — худшее в строке.

Выше 30° AR20 лучше остальных: 0.56 м на 30–45°, 0.34 м на 45–60°, 0.21 м на 60–90°. Хуже всех на 45–60° G3-AI (0.66 м) и ZEPHYR (0.58 м). Диапазон 10–30° практически одинаков для всех антенн; на 5–10° лучшим оказался AS10 (1.46 м), худшим CR-G3 (2.71 м). Следует учесть, что код в данных, судя по очень малому шуму за 1 с (8–17 мм), сглажен по фазе, поэтому MP отражает медленные ошибки, а не шум приёмника.

4.5 Шум фазы и непрерывность

Таблица 7. Шум фазы за 1 с по антеннам (мм, робастная оценка)

Сигнал	800S	G3-AI	AR20	AS10	CR-G3	ZEPHYR
GPS L1C	2.4	2.1	2.4	2.2	2.0	2.5
GPS L2W	3.3	4.2	4.6	3.9	5.0	4.4
Galileo E1	1.5	1.7	2.0	1.8	1.7	2.3
Galileo E5a	2.1	1.9	2.3	1.6	2.5	2.5
BDS B1I	2.1	1.8	2.3	2.1	2.3	1.9

Фазовый шум составляет 1.5–2.5 мм на L1/E1/B1I/E5a и 3.3–5.0 мм на GPS L2W. Различия между антеннами не превышают 1 мм и сопоставимы с погрешностью оценки.

Таблица 8. Срывы фазы / число дуг слежения за час

Антенна	GPS	Galileo	BeiDou
800S	0 / 179	0 / 75	1 / 53
G3-AI	1 / 152	0 / 79	0 / 42
AR20	1 / 208	0 / 42	0 / 91
AS10	0 / 173	0 / 45	1 / 68
CR-G3	0 / 237	0 / 46	0 / 39
ZEPHYR	0 / 153	0 / 69	0 / 49

Срывов фазы практически нет (0–1 на созвездие за час). Заметно различается дробление дуг: по GPS у CR-G3 237 дуг и у AR20 208 против 152–179 у остальных; по BeiDou у AR20 91 дуга против 39–68. Это указывает на более частые короткие потери слежения за слабыми и низкими спутниками, а не на нарушения фазы.

4.6 Азимутальная неоднородность

Таблица 9. Отклонение SNR от среднего (дБ·Гц) по азимуту, L1-диапазон, возвышение 15–60°

Азимут	800S	G3-AI	AR20	AS10	CR-G3	ZEPHYR
0–45°	+0.85	+0.53	−0.88	+0.89	+0.24	−1.63
45–90°	+0.22	+0.57	−0.30	+0.19	+0.42	−1.10
90–135°	−0.91	+0.78	+0.10	−0.29	+0.84	−0.52
135–180°	−0.85	+1.12	−0.46	−0.14	+0.96	−0.62
180–225°	−0.49	−2.14	+2.52	−0.41	+2.47	−1.94
225–270°	−0.31	+0.72	−0.47	+1.46	−0.07	−1.34
270–315°	−0.30	+0.20	+0.25	+0.48	+0.62	−1.25
315–360°	+0.66	+0.25	−0.57	+1.22	+0.55	−2.12

В секторе 180–225° разброс между антеннами достигает 5 дБ·Гц: G3-AI (−2.14) и ZEPHYR (−1.94) слабее среднего, AR20 (+2.52) и CR-G3 (+2.47) сильнее. Узор повторяется у спутников четырёх систем (E23, C41, G22, R01 и др.), значит, он не связан с отдельным спутником. С учётом расположения антенн (раздел 4.7) G3-AI и ZEPHYR находятся на западной стороне площадки, AR20 и CR-G3 — на восточной. Вероятная причина — затенение или отражение от объекта юго-западнее группы. Это предположение следует проверить осмотром площадки.

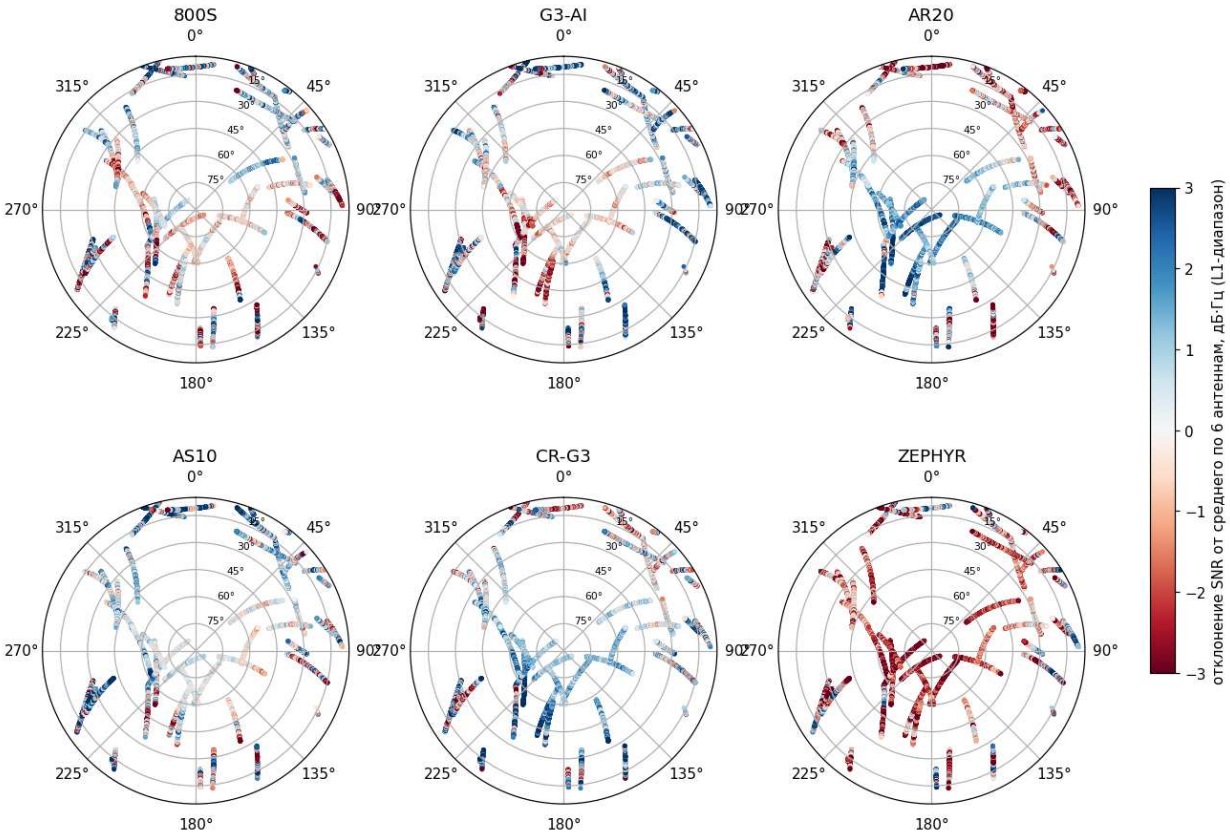


Рисунок 5. *Skyplot: отклонение SNR каждой антенны от среднего (L1-диапазон). Красный — слабее среднего, синий — сильнее.*

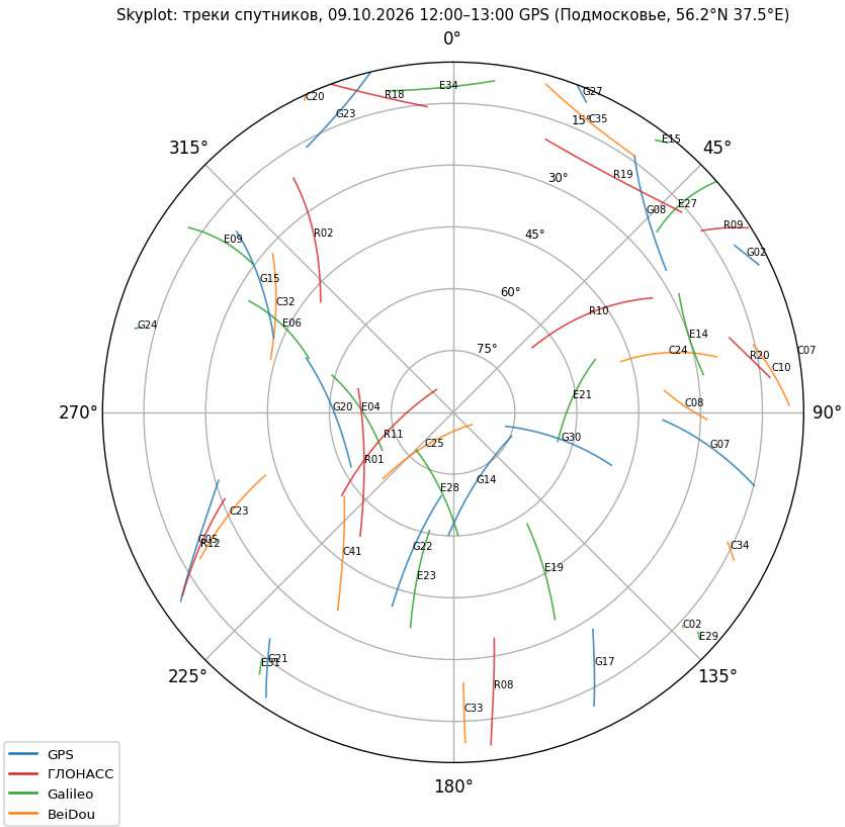


Рисунок 6. *Skyplot: треки спутников (вид сверху, север сверху).*

4.7 Смещения фазовых центров и PCV

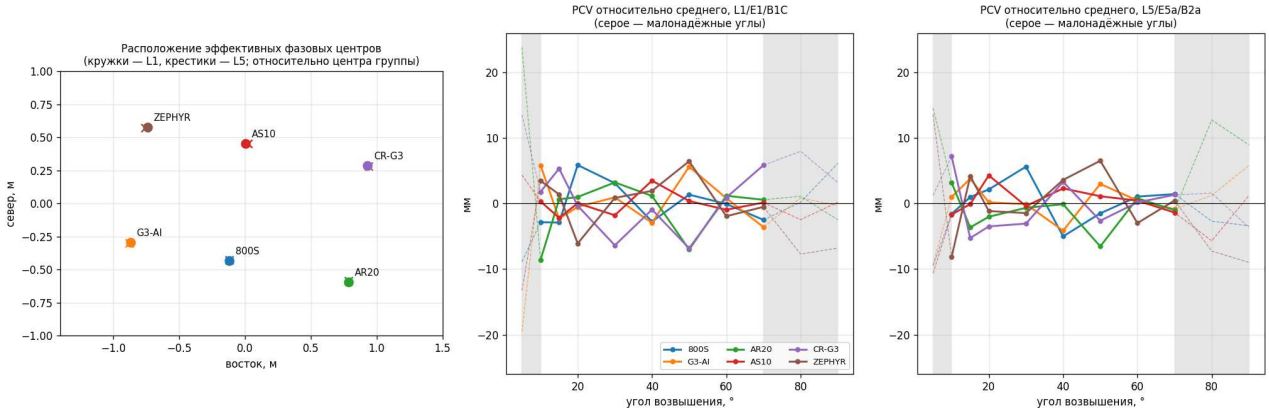


Рисунок 7. *Расположение эффективных фазовых центров (слева) и PCV относительно среднего по группе для L1 и L5.*

Таблица 10. Положение эффективных фазовых центров относительно центра группы (мм)

Антенна	L1 E	L1 N	L1 U	L5 E	L5 N	L5 U
800S	−118	−430	−5	−119	−428	−11
G3-AI	−868	−295	−43	−875	−298	−38
AR20	+785	−595	+50	+789	−583	+76
AS10	+7	+455	−3	+23	+455	−20
CR-G3	+932	+288	+16	+938	+281	+37
ZEPHYR	−739	+577	−15	−755	+574	−44

Оценки по L1 и L5 совпадают в пределах 1–2 см по горизонтали. Антенны расположены в пределах 1.8 м по оси восток–запад (G3-AI на западе, CR-G3 на востоке) и 1.2 м по оси север–юг (AR20 на юге, ZEPHYR на севере). Расстояния между парами 0.76 м (AS10–ZEPHYR) – 1.93 м (AR20–ZEPHYR; G3-AI–CR-G3 1.90 м). Невязка замыкания по 15 парам: L1 — 5.4 / 3.5 / 7.1 мм (E / N / U), L5 — 9.2 / 2.3 / 4.4 мм. Расхождение первой и второй половин часа достигает 66 мм, поэтому горизонтальная погрешность принимается равной ±3–6 см. Вертикальная составляющая неотделима от разницы высот установки и поворота антенн (набег фазы) и приведена для полноты.

Таблица 11. RMS PCV (мм) относительно среднего по группе, углы 10–70°

Антенна	L1 / E1 / B1C	L5 / E5a / B2a
800S	3.1	3.0
G3-AI	3.4	2.3
AR20	4.2	3.0
AS10	1.6	1.9
CR-G3	4.4	3.9
ZEPHYR	3.6	4.4

Воспроизводимость PCV между половинами часа в диапазоне 10–70° составляет 3.4 мм (L1) и 4.0 мм (L5), то есть сопоставима со значениями PCV. Кривые L1 и L5 слабо коррелируют между собой. **Вывод: достоверных различий PCV между антеннами на уровне выше нескольких миллиметров данные не показывают.** Узлы 5° и 80–90° ненадёжны (повторяемость 7–14 мм). Для L2 оценка не выполнена: доступен только GPS L2W, геометрии за час недостаточно. Все 15 пар приведены в приложении A и в файле antennas_offsets_pcv.xlsx.

5. Ограничения

- Угол возвышения вычислен по бродкастным эфемеридам из потока RTCM; ионосфера и тропосфера при проверке не моделировались.
- Результаты относятся к одному часу наблюдений. Для устойчивых оценок PCV нужна серия длиннее нескольких часов и нескольких суток.
- Не учитывались азимутальные PCV и разный поворот антенн (фазовый набег); они, как и многолучёвость площадки, входят в остаток 7–10 мм.
- Код в данных, по-видимому, сглажен по фазе, поэтому сравнение шума кода между антеннами малоинформативно.
- Если приёмники или тракты на самом деле различаются, часть различий SNR приходится не на антенны.

6. Рекомендации по выбору

Таблица 12. Выбор антенны под задачу

Задача	Рекомендуемые антенны	Комментарий
Максимальная точность на открытом небе	AR20	Минимальная многолучёвость выше 30°, высокий SNR в зените; теряет спутники ниже 7–10°
Много спутников у горизонта (город, лес)	AS10, G3-AI	Пропуск слабых спутников 6.0–7.2% на 5–10° против 22% у AR20; выше многолучёвость на средних и больших углах
Универсальное применение, L1	AS10, CR-G3	AS10 лучше на низких углах, CR-G3 лучше на высоких; у CR-G3 слабый L2/L5 до 30°
Работа на L2/L5 на низких углах	800S	Лучший SNR на L2/L5 до 30° (+1.3…+1.6 дБ·Гц); больше пропуски слабых спутников
Антенна без выраженных преимуществ в этих данных	ZEPHYR	Слабее остальных на L1 на всех углах, многолучёвость и чувствительность средние

Приложение А. Смещения и PCV для всех пар антенн

Смещение — положение антенны i минус положение антенны j (мм). Горизонтальное расстояние — в метрах. RMS PCV — разность PCV антенн i и j в диапазоне 10–70° (мм). Положительное значение PCV означает большую измеренную дальность у антенны i.

Таблица 13. Взаимные смещения (L1) и PCV по парам

Пара	ΔE, мм	ΔN, мм	ΔU, мм	Гориз. L1, м	Гориз. L5, м	RMS PCV L1	RMS PCV L5
800S–G3-AI	+750	−134	+38	0.762	0.767	4.2	3.1
800S–AR20	−903	+166	−55	0.918	0.921	4.6	4.4
800S–AS10	−125	−885	−2	0.893	0.894	3.8	3.7
800S–CR-G3	−1051	−718	−21	1.272	1.273	6.7	6.1
800S–ZEPHYR	+620	−1007	+10	1.182	1.187	5.7	5.8
G3-AI–AR20	−1653	+300	−93	1.680	1.689	7.2	4.6
G3-AI–AS10	−875	−751	−39	1.153	1.172	3.9	3.3
G3-AI–CR-G3	−1801	−584	−58	1.893	1.904	6.9	5.4
G3-AI–ZEPHYR	−130	−873	−28	0.882	0.880	3.4	4.7
AR20–AS10	+778	−1050	+54	1.307	1.291	4.7	4.2
AR20–CR-G3	−147	−883	+35	0.895	0.877	5.7	2.7
AR20–ZEPHYR	+1524	−1172	+65	1.922	1.930	7.0	7.0
AS10–CR-G3	−925	+167	−19	0.940	0.932	4.8	4.9
AS10–ZEPHYR	+746	−122	+12	0.756	0.787	3.7	4.1
CR-G3–ZEPHYR	+1671	−289	+31	1.696	1.718	6.5	7.3

www.glosnalab.ru