

## Сравнение характеристик бортовых стандартов частоты на основе высокоточных данных международной службы ГНСС

© А. В. Сальцберг<sup>1</sup>, К. Г. Шупен<sup>2</sup>, О. Е. Нечаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Филиал «ПНБО» АО «НПК «СПП», г. Королёв, Моск. обл., Россия

### Реферат

Точность навигационно-временного обеспечения потребителя в значительной степени определяется свойствами квантового стандарта частоты, функционирующего на борту космического аппарата ГНСС. Анализ характеристик бортовых квантовых стандартов частоты при их наземной экспериментальной отработке и летной эксплуатации необходим для оперативного учета изменений этих характеристик вследствие старения или воздействия внешних факторов, поскольку позволяет повышать точность синхронизации времени в ГНСС. Целью данной работы является анализ характеристик бортовых стандартов частоты разных типов в составе ГНСС и оценка потенциальной точности прогнозирования бортовых шкал времени космических аппаратов различных ГНСС на основе реальных данных.

Основу используемого методического подхода к оценке точностных характеристик составляет анализ стохастического поведения квантового стандарта частоты с использованием девиаций Аллана, Адамара или их модифицированных разновидностей и временной девиации.

В статье представлены оценки точностных характеристик бортовых квантовых стандартов частоты за 2022 год на основе высокоточных апостериорных данных. Выполнено их сравнение с результатами, полученными за 2020 год. Приведена интерпретация результатов с точки зрения анализа состава шумов, присущих различным типам квантовых стандартов частоты. Получены минимальные значения достижимой точности прогнозирования частотно-временных поправок к бортовым шкалам времени космических аппаратов. Показано, что сравнительный анализ точностных характеристик квантовых стандартов частоты, применяемых в современных ГНСС, позволяет наилучшим образом отслеживать и учитывать особенности поведения каждого бортового стандарта частоты при эксплуатации.

**Ключевые слова:** ГНСС, частотно-временное обеспечение, квантовые стандарты частоты, бортовая шкала времени, девиация Аллана, временная девиация, точность прогнозирования.

*Контакты для связи:* Сальцберг Александра Валерьевна ([a.saltsberg@irt.ru](mailto:a.saltsberg@irt.ru)).

**Для цитирования:** Сальцберг А. В., Шупен К. Г., Нечаева О. Е. Сравнение характеристик бортовых стандартов частоты на основе высокоточных данных международной службы ГНСС // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 68. С. 26–35.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.68.26-35>

## Comparison of Onboard Frequency Standards Performance Based on High-Precision Data from the International GNSS Service

A. V. Saltsberg<sup>1</sup>, K. G. Shupen<sup>2</sup>, O. E. Nechaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC “Obukhov Plant”, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Affiliated branch “Precision Navigation and Ballistic Support” of JSC “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Korolev, Russia

### Abstract

The accuracy of the user navigation and time support is largely determined by the properties of the atomic frequency standard operating on board the GNSS satellite. Onboard atomic frequency standards characteristics analyzed during their ground-based testing and flight operation is necessary to operationally account for changes in these characteristics due to aging or the external factors influence, since it allows to increase the accuracy of time synchronization in GNSS. The purpose of this work is to analyze different types of GNSS onboard frequency standards characteristics and to evaluate the potential satellite time clock offset prediction accuracy for various GNSS based on real data.

The basis of the methodological approach used to assess the performance characteristics is the analysis of the atomic frequency standard stochastic behavior using Allan, Hadamard deviations or their modified varieties and time deviation.

The paper presents the estimates of the characteristics of onboard quantum frequency standards for 2022 based on high-precision a posteriori data. They are compared with the previously obtained results for 2020. The interpretation of the results obtained in terms of analyzing the noise composition inherent in different types of atomic frequency standards is given. The estimates of the potential satellite time clock offset prediction accuracy are obtained. It is shown that a

comparative analysis of the performance of atomic frequency standards used in modern GNSS makes it possible to best monitor and account for the behavior of each onboard frequency standard during operation.

**Keywords:** GNSS, time-frequency support, atomic frequency standards, satellite time scale, Allan deviation, Hadamar deviation, time deviation, prediction accuracy.

*Contacts: Alexandra V. Saltsberg (rnvc@irt.ru).*

**For citation:** Saltsberg A. V., Shupen K. G., Nechaeva O. E. Comparison of characteristics of onboard frequency standards performance based on high-precision data from the international GNSS service // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 68. P. 26–35.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.68.26-35>

## Введение

В связи с широким распространением ГНСС во всех сферах современного общества постоянно повышаются требования, предъявляемые к точности предоставляемых навигационных услуг. В свою очередь, точность навигации потребителя в значительной степени определяется свойствами квантового стандарта частоты (КСЧ), функционирующего на борту КА ГНСС. Тип КСЧ и его характеристики имеют решающее значение для построения стратегии синхронизации времени в ГНСС с целью уменьшения погрешности прогнозирования расхождения бортовых шкал времени (БШВ) КА относительно шкалы системного времени ГНСС. Вклад погрешности прогнозирования расхождения ШВ в значение эквивалентной погрешности измерения дальности потребителя определяет точность навигационных и координатно-временных определений по сигналам КА ГНСС.

Современной тенденцией развития ГНСС является наличие на борту КА трех-четырех КСЧ различного типа, один из которых — рабочий, а остальные — резервные. В настоящее время на борту КА для формирования БШВ применяются цезиевые КСЧ (Cs-КСЧ), рубидиевые КСЧ (Rb-КСЧ) и пассивные водородные стандарты частоты (ПВСЧ).

Целью работы является анализ характеристик бортовых КСЧ разных типов в составе ГНСС и оценка потенциальной точности синхронизации БШВ КА различных ГНСС на основе реальных данных.

## Бортовые квантовые стандарты частоты

Характеристики бортового КСЧ зависят от используемого рабочего вещества и физических принципов, заложенных в его основу. Кроме того, поведение бортовых КСЧ отличается от поведения аналогичных наземных экземпляров, поскольку бортовые КСЧ подвержены воздействию космической среды, а формируемый на их основе сигнал для наземного потребителя искажается за счет трассы распространения (тропосферных и ионосферных задержек, многолучевости и т. д.) и релятивистско-гравитационных эффектов.

Анализ характеристик бортовых КСЧ при их наземной экспериментальной отработке и летной

эксплуатации с целью оперативного учета изменений этих характеристик вследствие старения или воздействия внешних факторов позволяет повышать точность синхронизации времени в ГНСС за счет оптимизации математических моделей и алгоритмов.

Бортовые КСЧ должны удовлетворять строгим требованиям к их автоматической работе в течение многих лет (Rochat, 2012). Они должны гарантировать достаточную и надежную производительность на протяжении всего заданного времени функционирования, соответствовать ограничениям по массе, объему и расходу энергии, выдерживать условия запуска (ударную нагрузку, ускорение и вибрацию) и работать в специальных условиях эксплуатации (вакуум, термические циклы, излучения, магнитные поля и при воздействии др. факторов).

Rb-КСЧ на газовой ячейке являются лучшим выбором с точки зрения соотношения между демонстрируемыми характеристиками и массой, при этом они не имеют больших ограничений срока эксплуатации по сравнению с предыдущими поколениями технологий КСЧ (Rochat, 2012). Реализованная в таких стандартах технология подразумевает очень точную и высокопроизводительную схему возбуждения и детектирования атомных линий, что обеспечивает хорошую краткосрочную и среднесрочную стабильности. Однако КСЧ этого типа могут демонстрировать скачки частоты под воздействием ионизирующего излучения, микрогравитации, изменений магнитного поля и других факторов.

ПВСЧ обладают высокими характеристиками с точки зрения автономности и стабильности на интервалах измерения от 10 с до суток, а также гораздо менее чувствительны к большинству внешних воздействий, чем Rb-КСЧ.

Cs-КСЧ на атомно-лучевой трубке является первичной мерой, на основе которой в 1967 г. была введена атомная секунда, основанная на переходе атомов  $^{133}\text{Cs}$ . За прошедшее время были отработаны базовые технологии создания Cs-КСЧ и накоплен значительный опыт их эксплуатации. Cs-КСЧ не испытывают скачков частоты во время запуска и, как демонстрирует система ГЛОНАСС, сохраняют рабочие и точностные характеристики даже за пределами гарантийного срока эксплуатации.



Практически на всех КА Galileo (кроме КА 11) в качестве основных функционируют ПВСЧ, но почти все они оснащены резервным Rb-КСЧ. Выбор «дуалистической технологии» для бортовых часов Galileo продиктован потребностью обеспечить достаточную степень надежности путем использования двух различных технологий для выполнения требований к двенадцатилетнему сроку эксплуатации КА Galileo и высокому уровню точности навигации (ИАЦ КВНО).

Группировка BeiDou в настоящее время включает в себя два поколения КА (BDS-2 и BDS-3), в каждом из которых есть КА на геостационарной (GEO), геосинхронной (IGSO) и средней околоземной (MEO) орбитах. BDS-2 построено с использованием Rb-КСЧ, однако последние КА работают преимущественно на ПВСЧ.

### Оценки нестабильности частоты различных типов КСЧ ГНСС

Основной критерий качества КСЧ — стабильность фазы и частоты КСЧ. Их исследование является основной составляющей процесса синхронизации ШВ ГНСС.

Оценивание технических характеристик (ТХ) для КА основных ГНСС проводилось с использованием ранее описанного методического подхода (Сальцберг, 2020) на интервале времени 01.01.22–31.12.22 по финальным апостериорным данным ИАЦ КВНО (ИАЦ КВНО). В исследовании не рассматривались КА, находящиеся на стадии испытаний или выведенные из системы по какой-либо причине.

Существуют различные показатели оценки нестабильности частоты КСЧ: среднее квадратическое относительное отклонение, среднее относительное двухвыборочное отклонение, средняя квадратическая относительная вариация и др. Общепринятыми в мировом сообществе ГНСС-характеристиками являются девиация Аллана с перекрытием и девиация Адамара, совместное использование которых позволяет численно и качественно сопоставлять уровень ТХ КСЧ различных типов, применяемых в современных ГНСС.

Полученные оценки нестабильности частоты КСЧ различных ГНСС представлены на рис. 2–5. Для наглядности на графиках обозначены уровни  $5 \cdot 10^{-14}$  и  $1 \cdot 10^{-14}$ , обеспечивающие навигацию потребителей ГНСС с точностью до единиц метров и лучше.

Анализируя наклон кривых на графиках, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что на всех интервалах измерения вплоть до двухсуточных у бортовых КСЧ КА ГЛОНАСС преобладает белый частотный шум, который хорошо прогнозируется при использовании наиболее распространенных математических методов (метод наименьших квадратов, фильтр Калмана и др.). Отсутствие дрейфа частоты позволяет использовать линейную математическую модель для построения прогноза ухода БШВ КА.

На рис. 2–5 результаты оценивания девиации Аллана сгруппированы по цветам, соответствующим типу КСЧ и поколениям развития каждой ГНСС.

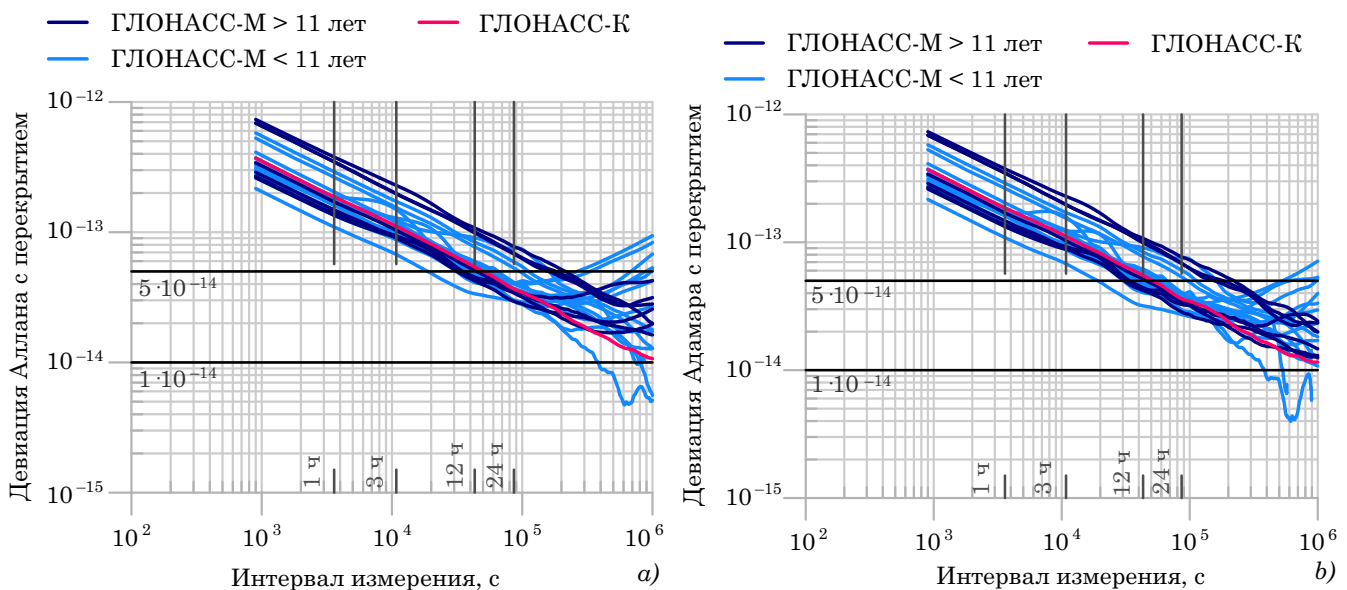


Рис. 2. Оценки нестабильности частоты бортовых КСЧ КА ГЛОНАСС по данным за 2022 г.: а) девиация Аллана с перекрытием; б) девиация Адамара с перекрытием

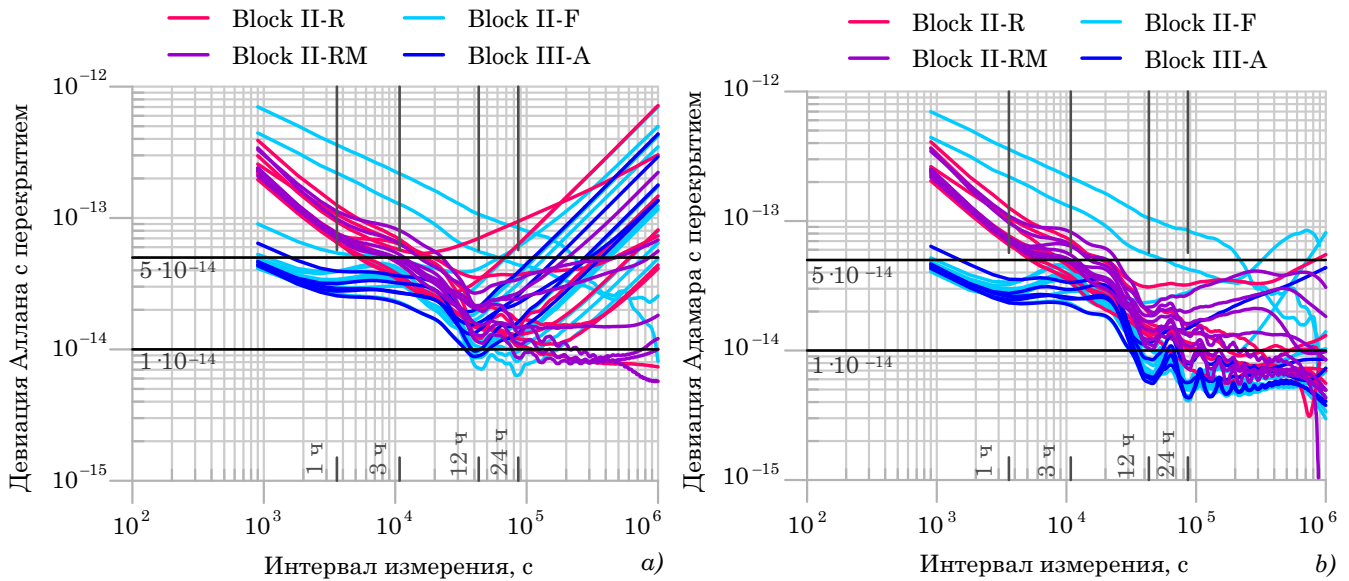


Рис. 3. Оценки нестабильности частоты бортовых КСЧ КА GPS по данным за 2022 г.: а) девиация Аллана с перекрытием, б) девиация Адамара с перекрытием

На рис. 3 хорошо заметно «разделение» ОГ GPS на две группы, различающиеся по кратковременной стабильности (на интервалах усреднения менее 3 ч). Аппараты из нижней группы относятся к сериям Block II-F и Block III-A. Уменьшение краткосрочной нестабильности КСЧ может эффективно использоваться для поддержания

сервисов высокоточного позиционирования PPP (Precise Point Positioning), поскольку аппаратное уменьшение нестабильности КСЧ повышает точность поправок к БШВ КА, вычисляемых в режиме реального времени, и, соответственно, улучшает точность навигационного PPP-решения.

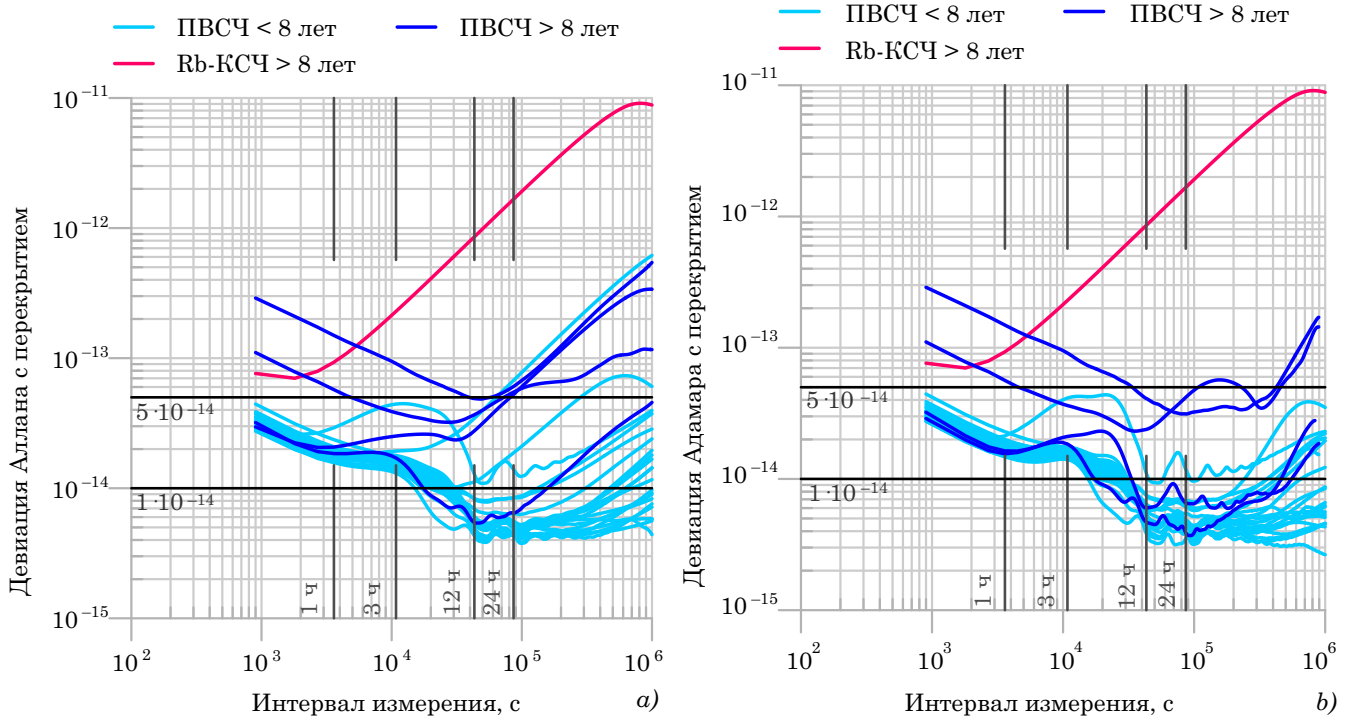


Рис. 4. Оценки нестабильности частоты бортовых КСЧ КА Galileo по данным за 2022 г.: а) девиация Аллана с перекрытием, б) девиация Адамара с перекрытием



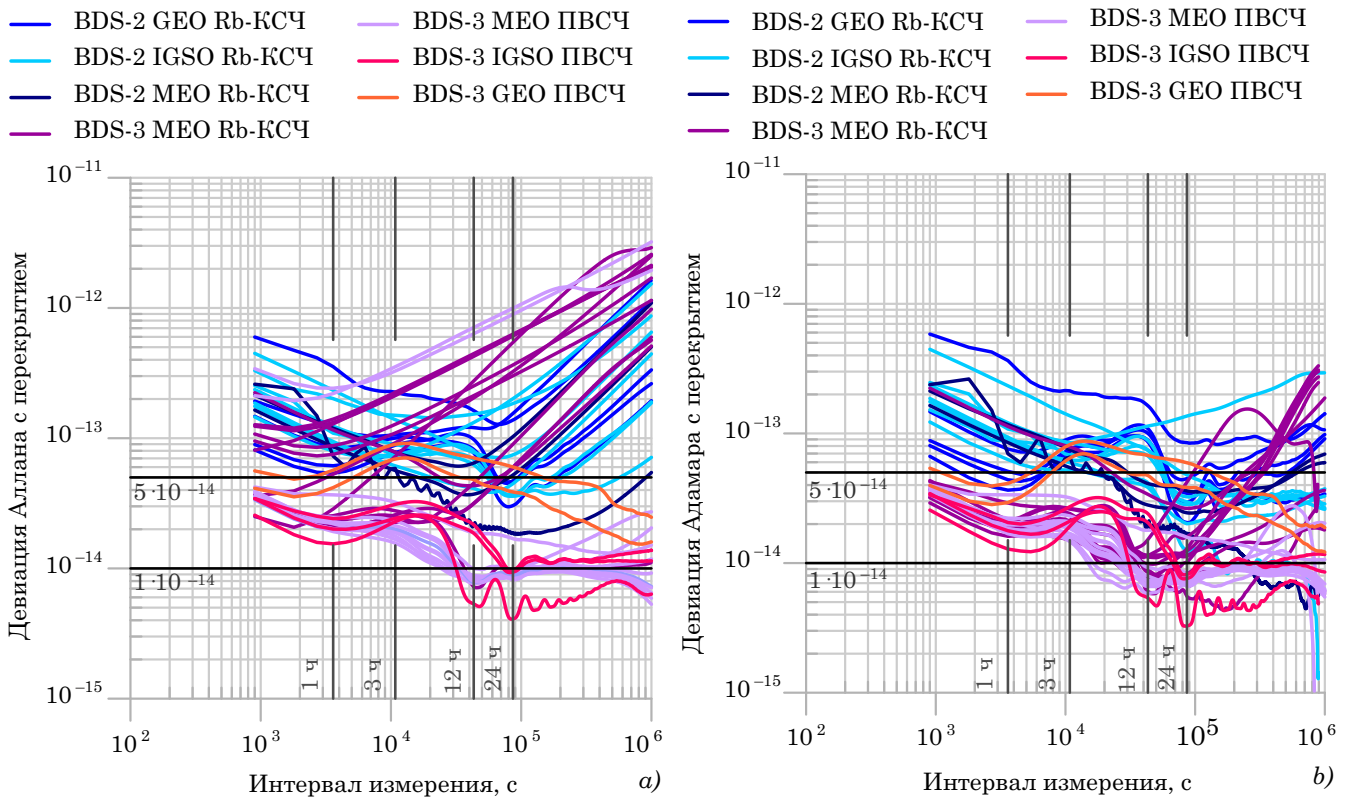


Рис. 5. Оценки нестабильности частоты бортовых КСЧ КА BeiDou по данным за 2022 г.: а) девиация Аллана с перекрытием, б) девиация Адамара с перекрытием

Как видно из рис. 3а, рис. 4а, рис. 5а у КСЧ КА GPS, Galileo и BeiDou на интервалах усреднения свыше 6 ч ярко выражен частотный дрейф, являющийся постоянным, т. е. у этих стандартов отсутствует нестабильность дрейфа. Следовательно, наличие дрейфа частоты — не проблема для построения модели прогнозирования ухода БШВ КА, достаточно обеспечить постоянство дрейфа на интервалах, в 5–10 раз превышающих стандартные интервалы прогнозирования поправок к БШВ КА, принятые в различных ГНСС. Наличие дрейфа частоты негативно отражается на оценках нестабильности частоты с использованием девиации Аллана, но не снижает точности прогнозирования поправок к БШВ за счет учета дрейфа в квадратичной модели ухода БШВ КА.

Кроме того, для большинства БШВ КА этих ГНСС при временах измерения свыше 12 ч явно прослеживается наличие периодических процессов, которые видны на кривых девиации как Аллана, так и Адамара. Поэтому для построения оптимальной модели таких БШВ КА необходимым является включение в нее также тригонометрической составляющей. Подобная модель рекомендуется Международной службой ГНСС (IGS) и рассматривается в ГНСС Galileo для КСЧ-РГЯ и ПВСЧ HYPERLINK \l "(Gonzalez, 2010).

В табл. 1 приведены средние значения девиации Аллана с перекрытием для выборочных времен измерения для разных типов КСЧ, функционирующих на различных поколениях КА ГНСС, а в табл. 2 девиации Адамара с перекрытием.

#### Сравнение результатов оценки ТХ КСЧ по данным за 2022 и 2020 гг.

Для анализа эволюции ТХ КСЧ во времени для различных ГНСС выполнено сравнение с полученными ранее результатами за 2020 г. (Салыберг, 2022). Сопоставление оценок нестабильности частоты бортовых КСЧ в виде девиаций Аллана и Адамара, усредненных по ОГ ГНСС для 2022 и 2020 гг., представлено на рис. 6а, б.

У всех ГНСС за исключением BeiDou наблюдается ухудшение стабильности бортовых КСЧ в частотной области и, как следствие, снижение потенциально достижимого порога точности прогнозирования. Улучшение демонстрируемых ТХ КСЧ, используемых в BeiDou, не связано с обновлением ОГ и может быть объяснено оптимизацией алгоритмов обработки принимаемого сигнала, например, исключением ранее не учтенных эффектов трассы распространения сигнала, улучшением моделей расчета эфемерид и т. д.

Таблица 1

Средние значения девиации Аллана с перекрытием для разных типов КСЧ, функционирующих на различных поколениях КА ГНСС ( $\cdot 10^{-14}$ )

Тип КСЧ	ГНСС	Интервал измерения, ч						
		1	2	3	6	9	12	24
Cs-КСЧ	ГЛОНАСС-М	21.27	15.62	13.05	9.28	7.34	6.35	4.59
	ГЛОНАСС-К	18.63	13.54	11.13	7.81	6.31	5.43	3.66
	GPS Block II-F	36.03	26.25	21.75	15.51	12.43	10.68	8.42
Rb-КСЧ	GPS Block II-R	8.70	6.23	5.24	3.78	3.12	2.87	3.54
	GPS Block II-RM	8.30	6.07	5.16	3.51	2.71	2.31	2.51
	GPS Block II-F	3.27	3.53	3.24	2.00	1.65	1.45	2.31
	GPS Block III-A	3.20	3.22	3.05	2.59	1.58	1.52	2.58
	Galileo	3.92	4.00	4.78	8.08	11.79	15.59	31.02
	BDS-2 GEO	4.92	6.88	7.94	7.16	6.25	5.93	4.94
	BDS-2 IGSO	13.33	10.33	9.47	8.97	8.97	8.78	8.78
	BDS-2 MEO	9.29	7.39	6.44	4.92	4.19	4.11	5.79
	BDS-3 MEO	7.11	8.81	10.32	13.99	17.11	20.07	30.56
ПВСЧ	Galileo < 8 лет	1.89	1.80	1.72	1.25	0.96	0.77	0.95
	Galileo > 8 лет	6.15	4.89	4.28	3.28	2.94	2.97	4.36
	BDS-3 GEO	4.17	5.94	6.92	5.97	5.05	4.80	3.87
	BDS-3 IGSO	1.99	2.27	2.61	2.60	1.85	1.52	0.78
	BDS-3 MEO	5.77	6.62	7.38	9.14	10.63	11.96	16.55

Таблица 2

Средние значения девиации Адамара с перекрытием при наличии дрейфа частоты для КСЧ, функционирующих на различных поколениях КА ГНСС ( $\cdot 10^{-14}$ )

Тип КСЧ	ГНСС	Интервал измерения, ч						
		1	2	3	6	9	12	24
Rb-КСЧ	GPS Block II-R	8.80	6.10	5.11	3.52	2.28	1.70	1.39
	GPS Block II-RM	7.60	5.87	5.32	3.60	2.20	1.56	1.59
	GPS Block II-F	2.82	3.41	3.38	2.08	1.33	0.75	0.48
	GPS Block III-A	2.84	3.02	2.84	2.81	1.17	0.80	0.78
	Galileo	3.59	2.91	2.72	2.31	2.02	1.98	3.32
	BDS-2 GEO	11.44	9.14	10.39	10.47	11.89	10.96	4.28
	BDS-2 IGSO	11.35	8.69	7.83	7.26	7.44	7.11	4.39
	BDS-2 MEO	9.06	7.29	6.51	5.08	3.55	2.95	2.58
	BDS-3 MEO	2.74	2.59	2.49	1.79	1.35	1.18	1.39
ПВСЧ	Galileo < 8 лет	1.74	1.66	1.71	1.31	0.86	0.56	0.52
	Galileo > 8 лет	5.92	4.71	4.17	3.11	2.32	1.89	2.09
	BDS-3 GEO	3.52	5.44	7.33	6.92	5.96	5.75	4.89
	BDS-3 IGSO	1.70	1.77	2.25	2.69	1.86	1.66	0.64
	BDS-3 MEO	1.97	2.07	2.03	1.60	0.98	0.68	0.71

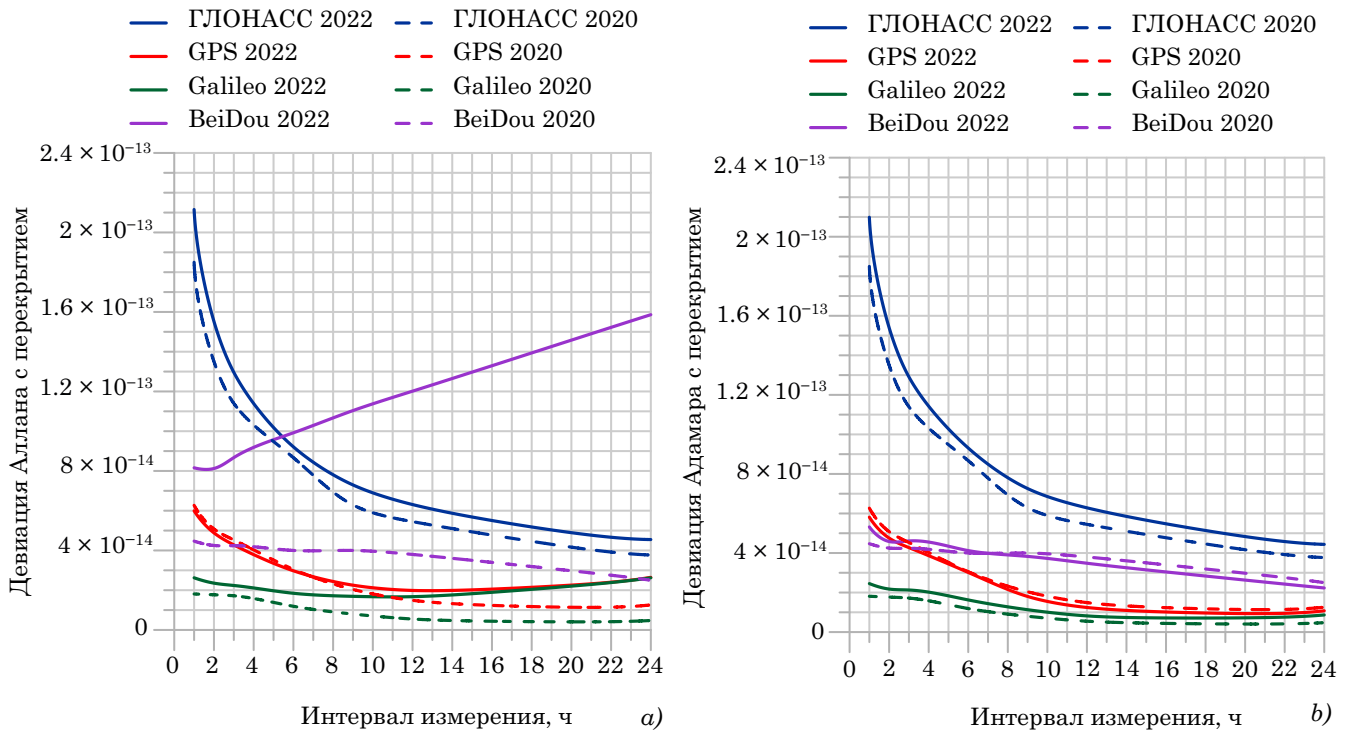


Рис. 6. Средние по ОГ различных ГНСС оценки нестабильности частоты за 2020 и 2022 г.: а) девиация Аллана с перекрытием; б) девиация Адамара с перекрытием

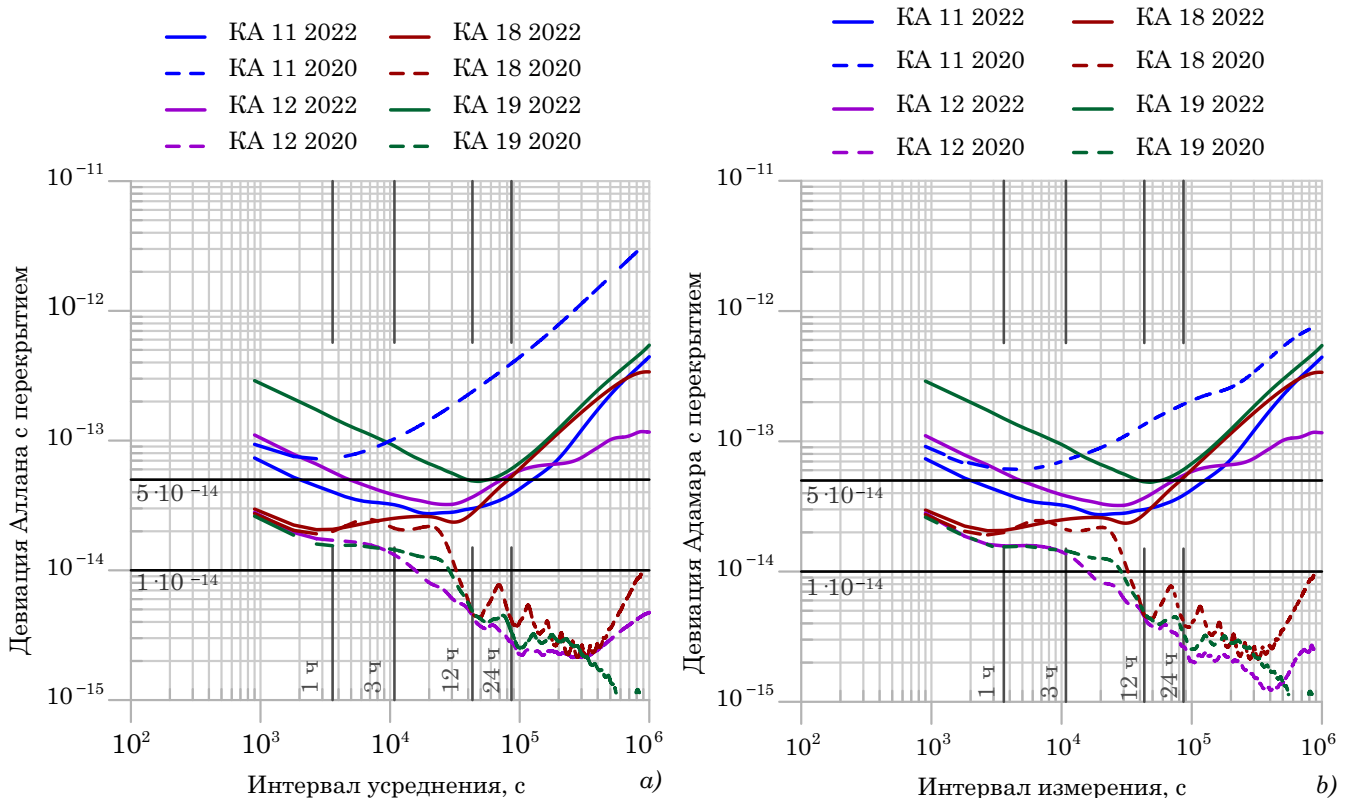


Рис. 7. Оценки нестабильности частоты бортовых КСЧ КА Galileo по данным за 2022 г.: а) девиация Аллана с перекрытием, б) девиация Адамара с перекрытием

Значительное ухудшение средних ТХ у Galileo по сравнению с демонстрируемыми показателями в 2020 г. обусловлено существенным снижением экс-

плуатационных характеристик Rb-КСЧ на КА 11, и ПВСЧ на КА 12, 18 и 19, запущенных более 8 лет назад, что проиллюстрировано на рис. 7.



### Оценки предельно достижимой точности прогнозирования частотно-временных поправок

Предельно достижимый уровень погрешности прогнозирования частотно-временных поправок при идеальной модели ухода БШВ КА оценивается на основе расчета временной девиации (Riley, 2008, p.18). Временная девиация как мера временной стабильности определяет предельный теоретический порог погрешности прогнозирования

при нулевых ошибках определения параметров истинной модели ухода БШВ КА. Значения временной девиации для бортовых КСЧ КА ГНСС на различных интервалах прогнозирования приведены на рис. 8.

В табл. 3 приведены средние по значения временной девиации на выборочных временах измерения для разных типов КСЧ, функционирующих на различных поколениях КА ГНСС.

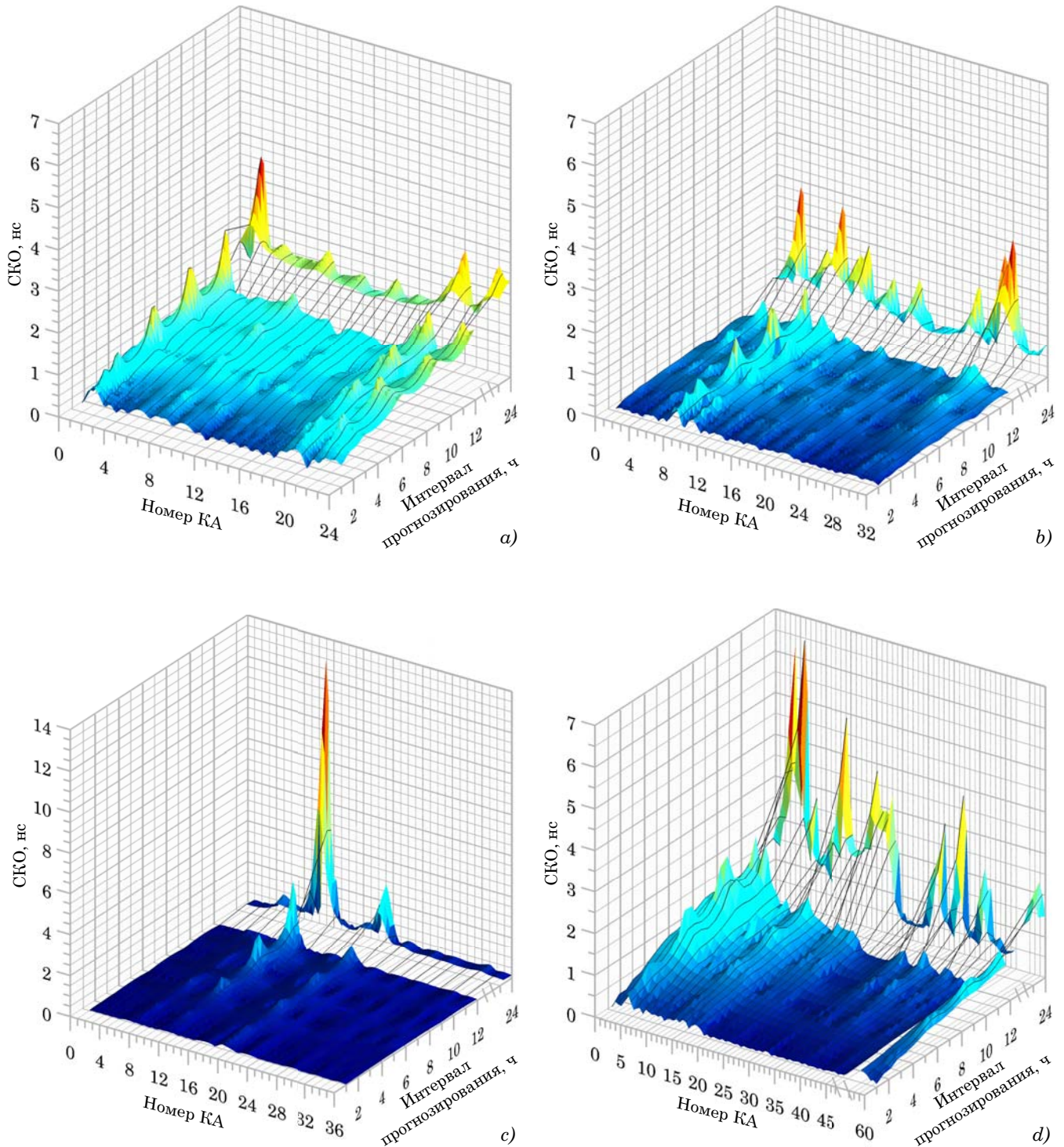


Рис. 8. Временная девиация для бортовых КСЧ КА ГНСС: а) ГЛОНАСС, б) GPS, в) Galileo, г) BeiDou

Средние значения временной девиации (в нс) для разных типов КСЧ, функционирующих на различных поколениях КА ГНСС

Тип КСЧ	ГНСС	Интервал измерения, ч						
		1	2	3	6	9	12	24
Cs-КСЧ	ГЛОНАСС-М	0.33	0.48	0.62	0.86	0.98	1.14	1.70
	ГЛОНАСС-К	0.28	0.41	0.49	0.69	0.83	0.95	1.30
	GPS Block II-F	0.54	0.76	0.95	1.32	1.57	1.83	2.78
Rb-КСЧ	GPS Block II-R	0.11	0.16	0.20	0.27	0.29	0.38	0.89
	GPS Block II-RM	0.11	0.20	0.25	0.29	0.27	0.35	0.78
	GPS Block II-F	0.12	0.21	0.26	0.35	0.40	0.53	1.38
	GPS Block III-A	0.05	0.10	0.15	0.21	0.19	0.31	1.10
	Galileo	0.07	0.15	0.27	0.89	1.94	3.41	13.39
	BDS-2 GEO	0.19	0.37	0.59	1.19	1.66	1.75	2.85
	BDS-2 IGSO	0.15	0.26	0.38	0.75	1.08	1.27	2.42
	BDS-2 MEO	0.14	0.22	0.28	0.45	0.61	0.88	2.73
	BDS-3 MEO	0.04	0.08	0.11	0.23	0.39	0.64	2.44
ПВСЧ	Galileo < 8 лет	0.03	0.06	0.08	0.11	0.10	0.12	0.26
	Galileo > 8 лет	0.09	0.15	0.19	0.29	0.38	0.52	1.48
	BDS-3 GEO	0.09	0.26	0.42	0.69	0.92	1.14	1.90
	BDS-3 IGSO	0.03	0.08	0.14	0.24	0.25	0.25	0.33
	BDS-3 MEO	0.04	0.07	0.09	0.13	0.17	0.24	0.68

## Заключение

Исходя из результатов оценивания и сравнения характеристик, можно выделить следующие тенденции в развитии зарубежных ГНСС:

- снижение краткосрочной нестабильности бортовых КСЧ (на интервалах 10–100 с) с целью поддержания PPP-режима, что позволяет удовлетворять повышенным требованиям к точности PPP-решения без увеличения темпа обновления эфемеридно-временной информации, выдаваемой потребителю;

- отказ от минимизации дрейфа частоты КСЧ и ужесточение требований к его стабильности;

- активное внедрение бортовых ПВСЧ.

Кроме того, очевидно, что разработчики «младших» ГНСС Galileo и BeiDou воспользовались возможностью обобщить опыт создателей «старших» поколений ГНСС (ГЛОНАСС и GPS) и избежать ряда ошибок при проектировании систем, демонстрируя к настоящему моменту более высокие ТХ и опережающие темпы развития.

Сравнительный анализ ТХ КСЧ, используемых в современных ГНСС, позволяет наилучшим образом отслеживать и учитывать особенности поведения каждого бортового КСЧ в составе ГНСС при эксплуатации.

Систематическая оценка характеристик КСЧ и оперативный учет изменения этих характеристик вследствие старения или воздействия внешних факторов являются одним из путей оптимизации

алгоритма прогнозирования частотно-временных поправок к бортовой шкале времени КА.

Результаты проведенного сравнительного анализа ТХ КСЧ, применяемых в современных ГНСС, позволяют определить наиболее перспективные направления развития системы ГЛОНАСС.

## Литература

Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП ЦНИИмаш. Прикладной потребительский центр [Электронный ресурс]. URL: <http://www.glonass-iac.ru/>. Архив данных: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/> (дата обращения: 12.05.2023).

Сальцберг А. В., Шупен К. Г. Пути улучшения среднесрочного прогноза частотно-временных поправок к бортовым шкалам времени ГНСС // Сб. статей «Радионавигационные технологии». Вып. 9 / Под ред. А. И. Перова. 2020. С. 83–91.

Сальцберг А. В., Шупен К. Г., Феоктистов А. Ю. Оценка состояния бортовых стандартов частоты глобальных навигационных спутниковых систем в процессе эксплуатации // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 11. С. 151–160.

Gonzalez F., Cernigliaro A., Tavella P., Boyero J. P. Clock strategy experimentation with GIOVE clocks // Proc. of the 24th European Frequency and Time Forum (EFTF-2010). 2010. 8 p.

Riley W. J. Handbook of frequency stability analysis // NIST Special Publication 1065. Washington: U.S. Government Printing office, 2008. 136 p.

Rochat P., Droz F., Wang Q., Froidevaux S. Atomic clocks and timing systems in Global Navigation Satellite Systems // Proc. of the European Navigation Conference. 2012. 11 p.