

**Н.В. Михайлов, В.В. Чистяков**

**ПРИЕМНИКИ СПУТНИКОВОЙ  
НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО  
БАЗИРОВАНИЯ: АРХИТЕКТУРА  
И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ**

**Монография**

**Воронеж  
Издательство «Научная книга»  
2014**

**УДК 629.05**  
**ББК 3 844я54**  
**М 69**

**Рецензенты:**

- Кошаев Д.А.,** д-р техн.наук (ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г.Санкт-Петербург);
- Якушенко С.А.,** канд. техн.наук, профессор кафедры (Военная академия связи, г.Санкт-Петербург)

**М 69 Михайлов, Н.В.** Приемники спутниковой навигации космического базирования: архитектура и первичная обработка сигналов: Монография/ Н.В. Михайлов, В.В. Чистяков. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2014. – 124 с.

**ISBN 978-5-98222-845-1**

Перед вами одна из первых отечественных книг, посвященных навигации космических аппаратов по сигналам спутниковых радионавигационных систем. Она обобщает многолетний научный и практический опыт авторов по разработке бортовой аппаратуры спутниковой навигации (БАСН) космического базирования. Мотивацией для написания монографии послужило то, что метод проектирования БАСН, разработанный авторами с коллегами и успешно примененный в одной из самых коммерчески успешных БАСН MosaicGNSS, не был систематически изложен. Консистентного, обоснованного и логически изложенного описания того, как спроектировать архитектуру БАСН и первичную обработку сигналов в ней, до сих пор не было. Этот пробел и призвана восполнить эта книга. Авторы надеются, что им удалось свести под одной обложкой систематическое изложение архитектуры и первичной обработки сигналов в радионавигационных приемниках космического базирования и заложить основы проектирования архитектуры БАСН и первичной обработки сигналов.

В монографии проведен анализ особенностей применения спутниковых радионавигационных систем на борту космических аппаратов, изложены научно-технические принципы проектирования БАСН, рассмотрены вопросы архитектуры приемников спутниковой радионавигации космического базирования и предложены методы проектирования первичной обработки сигналов в БАСН.

Книга будет полезна аспирантам и научным работникам, занимающимся проектированием навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем.

Библ. 40 назв.

**УДК 639.05**  
**ББК 3 844я54**  
**М 69**

**ISBN 978-5-98222-845-1**

**О Михайлов Н.В., Чистяков В.В., 2014**

## Оглавление

<b>Перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц и терминов</b>	<b>5</b>
<b>Предисловие</b>	<b>7</b>
<b>1 Анализ особенностей космического базирования радионавигационных приемников</b>	<b>9</b>
1.1 Программно-моделирующий комплекс для оценки условий приема сигналов на борту искусственных спутников Земли	10
1.1.1 Моделирование энергетических характеристик сигнала	11
1.1.2 Моделирование радиовидимости и геометрического фактора	13
1.1.3 Моделирование взаимных динамических характеристик ИСЗ и НС	15
1.2 Результаты моделирования	16
1.2.1 Высокие динамические характеристики	16
1.2.2 Пониженное отношение сигнал/шум	22
1.2.3 Плохая радиовидимость и высокий геометрический фактор	25
1.3 Особенности приема сигналов СРНС в космосе	31
Выводы	31
<b>2 Архитектура БАСН</b>	<b>32</b>
2.1 Принципы построения программных корреляторов	32
2.2 Расчет потребной производительности ЦПУ для программного коррелятора	36
2.3 Методы реализации программного коррелятора	40
2.4 Использование неполного ансамбля входных отсчетов	44
2.5 Метод SoftFlex	45
2.6 Проектирование БАСН с использованием метода SoftFlex	48
2.6.1 Генератор кода и демодуляция входного сигнала	48
2.6.2 Генератор несущей и компенсация доплеровского сдвига частоты	52
2.6.3 Восстановление кросс-корреляционных свойств укороченной ПСП	55
Выводы	59

<b>3</b>	<b>Первичная обработка сигналов в БАСН</b>	61
3.1	Методы поиска сигналов в БАСН	61
3.1.1	Принципы поиска сигналов в СРНС	61
3.1.2	Обзор схем поиска сигналов СРНС	64
3.1.3	Методы поиска сигналов в БАСН	69
3.2	Методы слежения за сигналами в БАСН	81
3.2.1	Схема слежения за задержкой сигнала в БАСН	81
3.2.2	Схема слежения за фазой несущей частоты сигнала в БАСН	91
3.3	Прием символов навигационного сообщения в БАСН	99
3.3.1	Вывод аналитических соотношений	100
3.3.2	Влияние погрешности оценки фазы ПСП на вероятность ошибки приема символов	101
3.3.3	Влияние погрешности оценки фазы несущей частоты на вероятность ошибки приема символов	102
3.3.4	Влияние внутрисистемных помех на вероятность ошибки приема символов	102
3.3.5	Результаты расчета	105
	Выводы	108
	<b>Заключение</b>	111
	<b>Приложение</b>	112
	<b>Список иллюстраций</b>	118
	<b>Список таблиц</b>	121
	<b>Список использованных источников</b>	122

## Перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц и терминов

АКФ	автокорреляционная функция
АП	аппаратура потребителя
АРУ	автоматическая регулировка усиления
АКФ	автокорреляционная функция
АФУ	антенно-фидерное устройство
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	амплитудно-частотная характеристика
БАСН	бортовая аппаратура спутниковой навигации
БГШ	белый гауссовский шум
БКУ	бортовой комплекс управления
БПФ	быстрое преобразование Фурье
ВКФ	взаимная корреляционная функция
ВОС	высокоорбитальный спутник
ВЭО	высокоэллиптическая орбита
ГЛОНАСС	глобальная спутниковая навигационная система
ГСК	географическая система координат
ГУК	генератор управляемый кодом
ГФ	геометрический фактор
ДН	диаграмма направленности
ДПФ	дискретное преобразование Фурье
ДХ	дискриминационная характеристика
ИСЗ	искусственный спутник Земли
КА	космический аппарат
МКК	многоканальный коррелятор
МКС	международная космическая станция
МШУ	малошумящий усилитель
НО	навигационное обеспечение
НОС	низкоорбитальный спутник
НП	наземный потребитель
НС	навигационный спутник
ОБПФ	обратное быстрое преобразование Фурье
ОГ	опорный генератор

ОДПФ	обратное дискретное преобразование Фурье
ОЗУ	оперативное запоминающее устройство
ПЗУ	постоянное запоминающее устройство
ПЛИС	программируемая логическая интегральная схема
ПО	программное обеспечение
ПСП	псевдослучайная последовательность
ПЧ	промежуточная частота
ПФ	полосовой фильтр
РНП	радионавигационные параметры
РПЧ	радиоприемная часть
СБИС	сверхбольшая интегральная схема
СИСЗ	стационарный искусственный спутник Земли
СКП	среднеквадратическая погрешность
СРНС	спутниковая радионавигационная система
ССЗ	система слежения за задержкой
ФАПЧ	фазовая автоподстройка частоты
ФНЧ	фильтр нижних частот
ЦПУ	центральное процессорное устройство
ЦПЧ	цифровой преобразователь частоты
ЧАП	частотная автоподстройка
ЧД	частота дискретизации
GPS	Global Positioning System
FIFO	First Input First Output
MMX	Multimedia Extensions
MIPS	Million Instructions Per Second
SIMD	Single Instruction Multiple Data
SSE	Streaming SIMD Extensions
TCXO	Temperature Controlled Crystal Oscillator
TLE	Two-Line Element
XO	Crystal Oscillator

## Предисловие

Эта книга обобщает научный и практический опыт авторов по разработке бортовой аппаратуры спутниковой навигации (БАСН) космического базирования. В книге проведен анализ особенностей применения спутниковых радионавигационных систем (СРНС) на борту искусственных спутников Земли (ИСЗ), изложены научно-технические принципы проектирования БАСН, рассмотрены вопросы архитектуры приемников спутниковой радионавигации космического базирования и предложены методы проектирования первичной обработки сигналов в БАСН.

Мотивацией для написания этой книги послужило то, что метод проектирования БАСН, разработанный авторами с коллегами и успешно примененный в одной из самых коммерчески успешных БАСН MosaicGNSS, не был систематически изложен. Отдельные публикации авторов с коллегами давали представление об отдельных элементах метода. Консистентного, обоснованного и логически изложенного описания того, как спроектировать архитектуру БАСН и первичную обработку сигналов в ней до сих пор не было. Этот пробел и призвана восполнить эта книга, в которую вошли как результаты исследований авторов, которые были опубликованы в 1998–2013 гг., так и неопубликованные материалы. Авторы надеются, что им удалось свести под одной обложкой систематическое изложение архитектуры и первичной обработки сигналов в радионавигационных приемниках космического базирования.

Материал книги организован следующим образом.

В первом разделе проведен анализ особенностей космического базирования радионавигационных приемников и показано, что условия приема сигналов СРНС для космического и наземного потребителей имеют ряд существенных различий. Эти различия следует учитывать при проектировании алгоритмов первичной обработки сигналов в БАСН. Также в первом разделе обобщены результаты особенностей космического базирования в виде задач, стоящих перед разработчиками космической аппаратуры спутниковой навигации. Решению этих задач в области архитектуры приемников и первичной обработки сигналов посвящены последующие разделы.

Во втором разделе исследована архитектура и проведен анализ способов построения радиационно-стойкой бортовой аппаратуры спутниковой навигации. Здесь также показана принципиальная возможность отказа от аппаратных корреляторов сигнала и построения БАСН на основе программного коррелятора. Проанализированы различные способы оптимизации вычисления корреляции входного сигнала с опорным и предложена архитектура программного коррелятора с переменным временем интегрирования. Рассмотрен принцип работы многоканального коррелятора (МКК) с переменным временем интегрирования, который заключается

в использовании неполного ансамбля входных отсчетов для вычисления корреляции входного сигнала с опорным. Предложен метод, позволяющий в режиме когерентного слежения за фазой несущей частоты улучшить помехоустойчивость БАСН в условиях широкого динамического диапазона уровня входных сигналов.

Третий раздел посвящен методам первичной обработки сигналов СРНС в приемнике с программным коррелятором. Проведен обзор известных схем поиска сигналов СРНС. Показано, что особенности космического базирования не позволяют использовать в общем случае методы ни параллельного, ни последовательного поиска сигналов. Для решения этой задачи предлагается комбинированный подход. Предложено четыре типа поиска сигналов в БАСН. Представлен метод расчета параметров поиска сигналов в БАСН и его применение к предложенным четырем типам поиска. Для следящих систем представлены методы слежения за задержкой огибающей и фазой несущей частоты в аппаратуре спутниковой навигации с программным коррелятором, позволяющие существенно снизить загрузку процессора по сравнению с традиционным подходом. Проанализировано влияние неполного ансамбля отсчетов входного сигнала на характеристики следящих петель. Показано, что использование части отсчетов входного сигнала приводит не только к энергетическим потерям, но и к появлению внутрисистемной помехи, вызванной ухудшением кросс-корреляционных свойств укороченной псевдослучайной последовательности (ПСП). Получены оценки влияния уменьшения числа используемых отсчетов на среднеквадратические погрешности определения фазы несущей частоты и огибающей сигнала. Проанализировано влияние внутрисистемной помехи на прием символов навигационного сообщения.

Эта книга будет полезна специалистам в области космической навигации, аспирантам и инженерам, занятым проектированием навигационной аппаратуры.

Авторы выражают благодарность всем своим коллегам, участвовавшим в разработке приемника MosaicGNSS. Без блестящей команды ученых, проектировщиков и инженеров эта книга не была бы написана. Мы благодарим компанию Astrium GmbH (Оттобрунн, ФРГ), чья вера в возможности российской команды сделала возможным научный и коммерческий успех MosaicGNSS.

33. Tao J. A Real-Time GPS Software Receiver Correlator Design for Embedded Platform / J. Tao, W. Yu // Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011). – Portland, 2011. – PP. 808–812.
34. Кудрявцев И. В., Мищенко И. Н., Волынкин А. И. и др. Бортовые устройства спутниковой навигации / под ред. В. С. Шебшаевича. – М. : Транспорт, 1988.
35. Kaplan E. D. and Hegarty C. Understanding GPS: Principles and Applications. – Boston : Artech House, Inc., 2006.
36. Дж. Дж. Стиффлер Теория синхронной связи. – М. : Связь, 1978.
37. Дж. Спилкер Цифровая спутниковая связь. – М. : Связь, 1979.
38. M. Pini Signal Compression for an Efficient and Simplified GNSS Signal Parallel Acquisition / M. Pini [et. al] // Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008). – Savannah, 2008. – PP. 159–166.
39. Сейдж Э., Мэлс Дж. Теория оценивания и её применение в связи и управлении. – М. : Связь, 1976. – 496 с.
40. Вальд А. Последовательный анализ. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 328 с.

---

Научное издание

**Николай Викторович Михайлов**  
**Валерий Валентинович Чистяков**

**ПРИЕМНИКИ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО  
БАЗИРОВАНИЯ: АРХИТЕКТУРА И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА  
СИГНАЛОВ**

Монография

Издание публикуется в авторской редакции

Дизайн обложки С.А.Кравец

---

Подписано в печать 11.02.2014. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ.л. 8,0. Заказ 000. Тираж 500 экз.

---

ООО Издательство «Научная книга»  
394077, Россия, г.Воронеж, ул. 60-й Армии, 25-120  
<http://www.sbook.ru/>

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в ООО «Цифровая полиграфия»  
394036, г. Воронеж, ул. Ф. Энгельса, 52.  
Тел.: (473)261-03-61