

Универсальный генератор дальномерных кодов сигналов спутниковых навигационных систем

© Авторы, 2019

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2019

О.К. Михайлова – студент, лаборант, лаборатория навигационных систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ»
E-mail: mikhaylova-o-k@yandex.ru

И.В. Корогодин – к.т.н., доцент, кафедра Радиотехнические системы, вед. науч. сотрудник, лаборатория навигационных систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ»
E-mail: korogodin@sms.ru

И.В. Липа – к.т.н., ст. науч. сотрудник, лаборатория навигационных систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ»
E-mail: ivan1502@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Навигационные системы постепенно развиваются: увеличивается численность орбитальной группировки, модифицируется и расширяется наземный комплекс управления, вводятся новые типы навигационных сигналов. Зачастую для различных сигналов в качестве дальномерных кодов используются различные типы ПСП. Это усложняет разработку аппаратуры и снижает гибкость её настройки.

Цель. Разработать универсальный генератор дальномерных кодов сигналов навигационных систем, найти его инициализирующие параметры, оценить ресурсоемкость и провести апробацию в составе навигационного приемника.

Результаты. Рассмотрены способы формирования дальномерных кодов сигналов навигационных систем. Предложена структура универсального генератора дальномерных кодов, основанная на регистрах сдвига с линейной обратной связью. Проведенный анализ структур генераторов, представленных в ИКД сигналов различных систем, позволил ограничиться двумя 14-ти разрядными регистрами. С помощью такого генератора возможно формирование почти 70% всех типов дальномерных кодов открытых сигналов глобальных спутниковых навигационных систем: ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou. Структура универсального генератора дальномерных кодов реализована в качестве модуля на языке SystemVerilog в составе программного обеспечения навигационного приемника. Приведены инициализирующие параметры для настройки универсального генератора для формирования дальномерных кодов различных навигационных сигналов. Проведен ряд экспериментов, подтверждающих правильность формирования дальномерных кодов.

Практическая значимость. Проведенный анализ ресурсоемкости универсального генератора в сравнении с специализированным генератором дальномерного кода сигнала GPS C/A показал, что хотя модуль универсального генератора расходует в 4 раза больше ресурсов, чем специализированный генератор, общий прирост ресурсоемкости канала коррелятора не превышает 5%. Сформулированы рекомендации по дальнейшей оптимизации универсального генератора.

Ключевые слова

ГНСС, ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou, ПСП, генератор кода, дальномерный код, псевдослучайная последовательность.

DOI: 10.18127/j00338486-201909(14)-04

Введение

Навигационные системы постепенно развиваются: увеличивается численность орбитальной группировки, модифицируется и расширяется наземный комплекс управления, вводятся новые типы навигационных сигналов. Число типов используемых навигационных сигналов стремительно растет – например, новые спутники ГЛОНАСС-K2 будут излучать 14 различных сигналов! Аналогичная тенденция наблюдается и в других навигационных системах: NAVSTAR GPS, Galileo, Beidou, QZSS. Зачастую для сигналов разного типа используются и разные типы псевдослучайных последовательностей (ПСП) в качестве дальномерных кодов [1, 2]. Генераторы этих последовательностей описаны в соответствующих интерфейсных контрольных документах (ИКД), но разнообразие видов генераторов усложняет разработку аппаратуры и снижает гибкость её настройки.

Ц е л ь р а б о т ы – разработать универсальный генератор дальномерных кодов сигналов навигационных систем, найти его инициализирующие параметры, оценить ресурсоемкость и провести апробацию в составе навигационного приемника.

Классификация генераторов

В ИКД различных ГНСС для каждого сигнала приведена рекомендуемая структура для формирования дальномерного кода. Все сигналы можно разделить на три группы по типу используемых генераторов дальномерного кода: 1) с формированием дальномерных кодов на регистрах сдвига с линейной обратной связью (linear-feedback shift register – LFSR); 2) с использованием табличных дальномерных кодов;

3) с формированием дальномерных кодов в виде хэш-функций от времени.

К сигналам третьей группы относятся закрытые сигналы, например, сигналы GPS с модуляцией P(Y)-кодом. Представителями второй группы являются сигналы системы Galileo E1 и E6. Первая группа самая многочисленная: для формирования дальномерных кодов здесь используются различные комбинации сдвиговых регистров. Остановимся на этой группе – ведь около 70% всех открытых сигналов используют именно такой метод.

Самая простая структура генератора дальномерного кода у сигнала ГЛОНАСС L1OF: он содержит один девятиразрядный регистр сдвига с отводами обратной связи из 5-го и 9-го разрядов регистра [3]. В начале работы регистр инициализируется единицами. Выходная последовательность является M-последовательностью с периодом $L = 2^9 - 1 = 511$ символов. Для формирования сигналов GPS L2C используется генератор усеченной M-последовательности. В этом случае установка начального состояния осуществляется принудительно через каждые $L = 767250$ тактов [4].

Дальномерные коды других сигналов формируются с использованием двух или более регистров, выходы которых суммируются по модулю 2. Так, например, в сигнале GPS L5 дальномерный код формируется путем суммирования по модулю 2 двух усеченных M-последовательностей [5]. Первая последовательность формируется с помощью 13-разрядного регистра, отводы обратной связи которого задаются полиномом $X = 1 + X + X^9 + X^{10} + X^{12} + X^{13}$. В начале работы он инициализируется единицами. Принудительный сброс в начальное состояние происходит либо при достижении состояния регистра «11111111101», либо при достижении счетчиком символов значения 10230 (то есть в конце эпохи дальномерного кода). Вторая последовательность формируется с помощью 13-разрядного регистра, отводы обратной связи которого задаются полиномом $X = 1 + X + X^3 + X^4 + X^6 + X^7 + X^8 + X^{12} + X^{13}$. Сброс в начальное состояние происходит в конце каждой эпохи. Начальные состояния этого регистра зависят от номера ПСП (таким образом, осуществляется кодовое разделение сигналов различных спутников).

Дальномерные коды, формируемые путем суммирования двух M-последовательностей, разделяются на два вида: коды Касами и коды Голда. Коды Касами формируются сложением последовательностей от двух регистров, причем длина одного из них в два раза короче. Например, в сигнале ГЛОНАСС L3OC в качестве дальномерного кода используются усеченные коды Касами, генератор которых содержит регистры с 7 и 14 разрядами [6]. Коды Голда формируются путем сложения последовательностей от двух регистров одинаковой длины, но с различными начальными состояниями и различными отводами обратной связи. Коды Голда используются, например, в сигналах GPS C/A, Galileo E5a, BeiDou B1I [7, 8].

Из сказанного следует, что генераторы на регистрах сдвига могут иметь разное число регистров, разные разрядности регистров, разные отводы обратной связи. По результатам анализа структуры генераторов дальномерных кодов, приведенных в ИКД различных систем, предложена универсальная структура генератора, с помощью которой возможно формирование большинства дальномерных кодов навигационных сигналов.

Предлагаемая структура универсального генератора

Универсальный генератор дальномерных кодов (рис. 1) состоит из двух 14-разрядных регистров сдвига

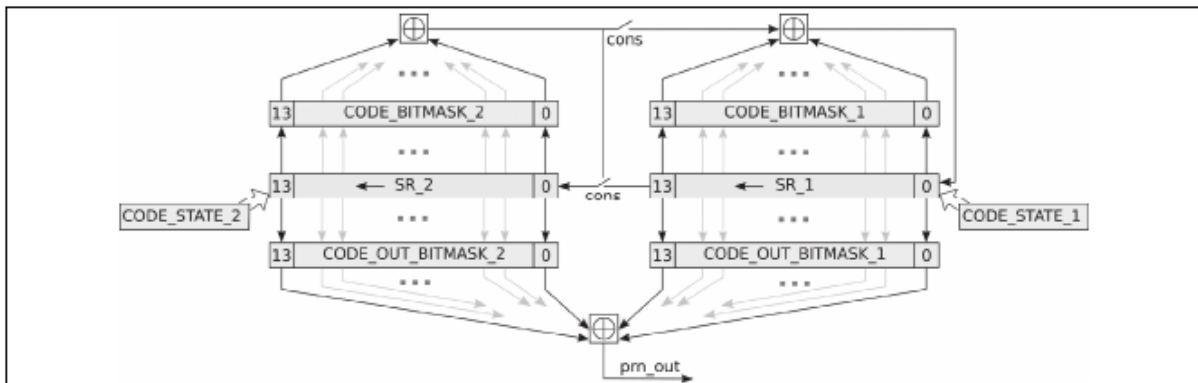


Рис. 1. Схема универсального генератора дальномерного кода
 Fig. 1. Structural scheme of the universal code generator

SR_1 и SR_2 с обратными связями, начальное состояние которых записывается из соответствующих регистров CODE_STATE_1 и CODE_STATE_2 при наступлении новой эпохи (окончании формируемой последовательности). Номера разрядов сдвигового регистра, с которых снимается сигнал для обратной связи, задается битовой маской, которая находится в регистрах CODE_BITMASK_1 и CODE_BITMASK_2. С помощью регистров CODE_OUT_BITMASK_1 и CODE_OUT_BITMASK_2 задаются номера разрядов для подачи на выходной умножитель по модулю 2. На каждом такте работы формируется один символ дальномерного кода. Управляя частотой поступления тактовых импульсов на генератор, можно управлять скоростью формирования символов.

В модели универсального генератора дальномерного кода для экономии ресурсов используется два режима работы: 1) два отдельных 14-разрядных регистра; 2) два регистра объединяются в один, образуя 28-разрядный регистр сдвига. Объединение регистров сдвига SR_1 и SR_2 осуществляется по флагу «cons». В начале работы регистры сдвига SR_1 и SR_2 инициализируются начальными состояниями. Далее работа генератора зависит от выбранного режима.

Режим 1. При использовании первого варианта схема представляет собой два генератора M-последовательности с различными начальными состояниями и разными номерами отводов обратной связи. При этом дальномерный код формируется путем суммирования по модулю 2 полученных M-последовательностей. На каждом шаге разряды, определяемые регистрами CODE_BITMASK_1 и CODE_BITMASK_2, суммируются по модулю 2. Далее регистры SR_1 и SR_2 сдвигаются влево, а рассчитанные значения записываются в младшие разряды соответствующих сдвиговых регистров.

Режим 2. При использовании второго варианта два регистра сдвига последовательно объединяются в один, образуя генератор M-последовательности большей длины, что позволяет формировать дальномерные коды для сигналов, требующих 27-разрядный регистр (сигналы GPS L2 CM, GPS L2 CL). На каждом шаге над разрядами, определяемыми регистрами CODE_BITMASK_1 и CODE_BITMASK_2, осуществляется операция «исключающее ИЛИ». Регистр SR_2 сдвигается влево, на место младшего бита записывается старший бит регистра SR_1. В то же время сдвигается влево регистр SR_1, и на место младшего бита регистра SR_1 записывается рассчитанный бит.

Выходная последовательность формируется путем суммирования по модулю два битов, определенных регистрами CODE_OUT_BITMASK_1 и CODE_OUT_BITMASK_2.

Инициализирующие параметры универсального генератора

Для формирования дальномерного кода с помощью структуры универсального генератора его необходимо настроить, записав соответствующие управляющие слова в регистры генератора.

В табл. 1–4 приведены инициализирующие параметры генератора для сигналов различных ГНСС. Все управляющие слова можно разделить на две группы. Первые три слова (bitmask1, bitmask2, outbitmask1) зависят только от типа сигнала, а остальные три слова (outbitmask2, codestate1, codestate2) зависят как от типа сигнала, так и от номера ПСП (то есть номера спутника).

Если управляющее слово зависит от номера ПСП, то для него в таблице указана совокупная маска, которая показывает все используемые разряды для формирования сигналов для всех номеров спутников. В строке «Итого» показаны все используемые разряды в управляющем слове для формирования всех типов сигналов системы и всех номеров ПСП. Это значение удобно использовать для анализа использования различных разрядов регистра.

Таблица 1. Инициализирующие параметры ГЛОНАСС

Тип сигнала	bitmask1	bitmask2	out bitmask1	out bitmask2	code state1	code state2
LxOF	00000100010000	–	00000001000000	–	00000111111111	–
L1OCd	00001001000000	00001101000100	00001000000000	00001000000000	00000001001100	{00001111110000}
L1OCp	00110010100000	00000000100001	00100000000000	00000000100000	00101000110000	{00000000111111}
L2OCp	11000010001000	00000001100000	10000000000000	00000001000000	00011100101100	{00000001111111}
L3OCd	11000010001000	00000001100000	10000000000000	00000001000000	00011100101100	{00000001111110}
L3OCp	11000010001000	00000001100000	10000000000000	00000001000000	00011100101100	{00000001111111}
Итого	11111111111000	00001101100101	10101001000000	00001001100000	00111111111111	{00001111111111}

Таблица 2. Инициализирующие параметры GPS

Тип сигнала	bitmask1	bitmask2	out bitmask1	out bitmask2	code state1	code state2
C/A	00001000000100	00001110100110	00001000000000	{00001111111111}	00001111111111	00001111111111
L2 CM	01001001010010	01010100111100	01000000000000	00000000000000	{01111111111111}	{11111111111111}
L2 CL	01001001010010	01010100111100	01000000000000	00000000000000	{01111111111111}	{11111111111111}
L5I	01101100000000	01100011101101	01000000000000	01000000000000	01111111111111	{01111111111111}
Итого	01101101010110	01111111111111	01001000000000	{01001111111111}	{01111111111111}	{11111111111111}

Таблица 3. Инициализирующие параметры Galileo

Тип сигнала	bitmask1	bitmask2	out bitmask1	out bitmask2	code state1	code state2
E5aI	10000010100001	10100011011000	10000000000000	10000000000000	11111111111111	{11111111111111}
E5aQ	10000010100001	10100011011000	10000000000000	10000000000000	11111111111111	{11111111111111}
E5bI	11010000001000	10100110010010	10000000000000	10000000000000	11111111111111	{11111111111111}
E5bQ	11010000001000	10001100110001	10000000000000	10000000000000	11111111111111	{11111111111111}
Итого	11010010101001	10101111111011	10000000000000	10000000000000	11111111111111	{11111111111111}

Таблица 4. Инициализирующие параметры BeiDou

Тип сигнала	bitmask1	bitmask2	out bitmask1	out bitmask2	code state1	code state2
B1I/B2I	00011111000001	00010110011111	00010000000000	{00011111111111}	00001010101010	00001010101010
B3I	01000000001101	01101101110001	01000000000000	01000000000000	01111111111111	{01111111111111}
B2ad	01010000010001	01110100010100	01000000000000	01000000000000	01111111111111	{01111111111111}
B2ap	01000001100100	01100011010001	01000000000000	01000000000000	01111111111111	{01111111111111}
Итого	01011111111101	01111111111101	01010000000000	{01011111111111}	01111111111111	{01111111111111}

Как следует из таблиц, группа регистров bitmask1, bitmask2 и out bitmask1 принимает только 14 различных состояний. Таким образом, их инициализацию можно заменить 4-битным словом. Такая замена может дать снижение ресурсоемкости при реализации генератора в заказной интегральной схеме.



Рис. 2. Схема стенда
Fig. 2. Structural scheme of the stand

навигационного приемника. Проведена серия экспериментов по приему навигационных сигналов различных типов с его помощью. В ходе экспериментов использовался стенд (рис. 2), состоящий из имитатора сигналов, навигационного приемника Cloniscus на базе СнК Zynq-7030 (разработка Лаборатории навигационных систем МЭИ) и персонального компьютера.

Для обмена данными с приемником использовался бинарный протокол обмена информацией, поддерживающий передачу на ПК 1-мс корреляционных сумм заданного канала. По этим данным построены корреляционные функции огибающих различных сигналов, на рис. 3–6 приведены результаты для ГЛОНАСС L1OCd, L1OCp, L2OCp и Beidou B1I соответственно. Форма корреляционных функ-

Корреляционные отклики

Описанный универсальный генератор был реализован в виде модуля на языке SystemVerilog в составе программного обеспечения нави-

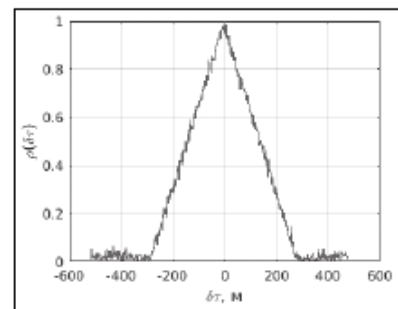


Рис. 3. Корреляционная функция сигнала ГЛОНАСС L1OCd
Fig. 3. GLONASS L1OCd

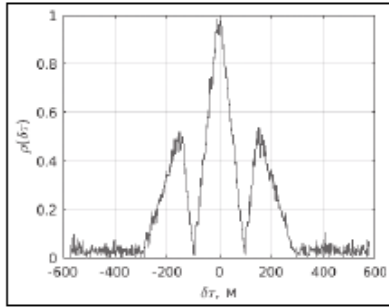


Рис. 4. Корреляционная функция сигнала ГЛОНАСС L1OCp
Fig. 4. GLONASS L1OCp

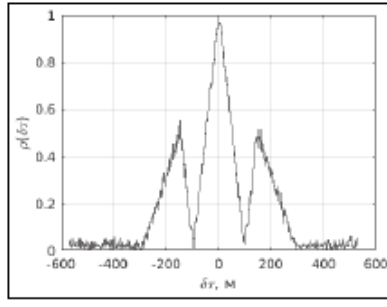


Рис. 5. Корреляционная функция сигнала ГЛОНАСС L2OCp
Fig. 5. GLONASS L2OCp

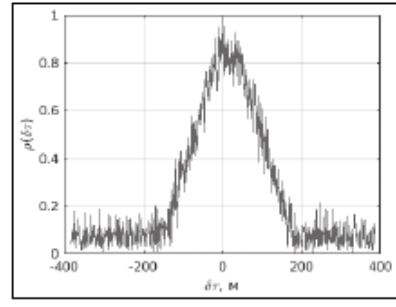


Рис. 6. Корреляционная функция сигнала Beidou B1I
Fig. 6. Beidou B1I

ций соответствует ожидаемым, что говорит о правильности формирования дальномерных кодов.

Анализ ресурсоемкости генератора при реализации на ПЛИС

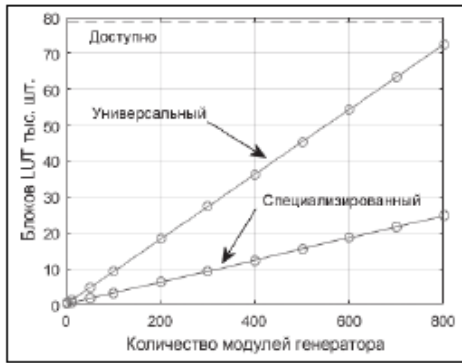


Рис. 7. Графическое представление расхода блоков LUT
Fig. 7. LUTs utilization

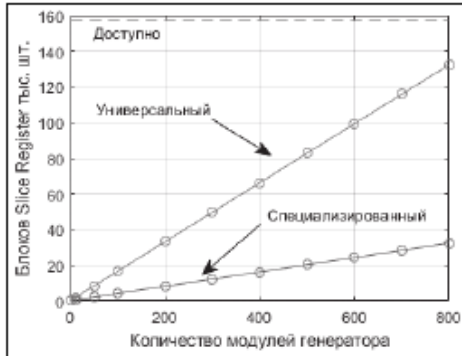


Рис. 8. Графическое представление расхода блоков slice register
Fig. 8. Slice registers utilization

На рис. 7–8 показаны зависимости расходуемых ресурсов ПЛИС от числа подключаемых модулей для двух типов генераторов: универсального генератора и генератора кода Голда сигнала GPS C/A (для сравнения). В качестве численной характеристики выбрано число используемых блоков ПЛИС «LUT» и «Slice Register», так как именно их дефицит ограничивает число каналов приемника.

Из графиков видно, что при увеличении числа подключаемых модулей, расход ресурсов увеличивается линейно, а значит, ресурсоемкость одного модуля может быть оценена по приращению показателя.

Модуль универсального генератора (с интерфейсом обращения к нему) при реализации на ПЛИС из состава Xilinx Zynq-7030 требует: 88 блоков LUT и 167 блоков Slice register. Специализированный модуль генератора дальномерного кода сигнала GPS C/A, включающий только два 10-ти разрядных регистра сдвига и интерфейс с уменьшенным числом управляющих слов, при реализации на ПЛИС занимает 26 блоков LUT и 40 блоков Slice register. Таким образом, универсальный генератор расходует примерно в четыре раза больше ресурсов ПЛИС, чем специализированный генератор дальномерного кода для сигнала GPS C/A.

Для сравнения, весь канал коррелятора с универсальным генератором в своем составе занимает на ПЛИС 1384 блока LUT и 2558 блоков Slice register, при этом модуль универсального генератора (с интерфейсом) занимает лишь 6% блоков LUT и 7% блоков Slice registers от числа используемых каналом коррелятора ресурсов. Хотя универсальный модуль расходует значительно больше ресурсов, чем специализированный генератор, общий прирост ресурсоемкости канала коррелятора не превышает 5%. Такова цена универ-

сальности.

Степень универсальности универсального генератора

Предлагаемая структура генератора позволяет сформировать дальномерные коды большинства навигационных сигналов с табличными генераторами, но, тем не менее, не все. Структура не позволяет формировать P-код системы GPS, а также коды Вейла. В табл. 5 для каждой из систем приведено общее число типов сигналов и число типов, поддерживаемых предлагаемым генератором. Как следует из таблицы, универсальный генератор поддерживает почти 70% от числа типов всех открытых сигналов.

Таблица 5. Покрытие открытых сигналов навигационных систем универсальным генератором

Тип системы	Всего открытых сигналов	Сигналы с ДК на регистрах сдвига	Возможно сформировать	Невозможно сформировать
ГЛОНАСС	7	7	7	0
GPS	9	7	5	4
Galileo	8	4	4	4
BeiDou	7	5	5	2
Итого	31	23	21	10

Заключение

Предложенная структура универсального генератора позволяет формировать дальномерные коды почти 70% всех типов открытых навигационных сигналов систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou. Приведены инициализационные параметры генератора для сигналов Gln L1OF, GlnL2OF, Gln L1OCd, Gln L1OCp, Gln L2OCp, Gln L3OCd, Gln L3OCp, GPS C/A, GPS L2 CM, GPS L2 CL, GPS L5 I/Q, Gal E5aI, Gal E5aQ, Gal E5bI, Gal E5bQ, Bds B1I, Bds B2I, Bds B3I, Bds B2ad, Bds B2ap, позволяющие формировать их дальномерные коды на универсальном генераторе.

Описанный универсальный генератор был реализован в виде модуля на языке SystemVerilog в составе программного обеспечения навигационного приемника. Выполненная серия экспериментов по приему навигационных сигналов различных типов с помощью приемника, в котором в качестве генератора дальномерного кода использовался универсальный генератор, подтвердила правильность формирования дальномерных кодов.

Проведенный анализ ресурсоемкости модуля универсального генератора показывает, что по сравнению со специализированным генератором кодов GPS C/A расход ресурсов ПЛИС на генератор возрастает в 4 раза. При этом ресурсоемкость канала коррелятора в целом повышается на 5%.

Литература

1. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника. 2010.
2. Шатилов А.Ю. Характеристики радиосигналов глобальных спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU и функциональных дополнений SBAS. Изд-во МЭИ. 2015.
3. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. 2010. (http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf).
4. Navstar GPS Space Segment/User Segment Interfaces, IS-GPS-200J. 2018. (<https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200J.pdf>).
5. Navstar GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces, IS-GPS-750. 2018. (<https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-750E.pdf>).
6. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L3. 2016. (<http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKDL3-s-kod.-razd.-Red-1.0-2016.pdf>).
7. European GNSS (Galileo) open service signal-in-space interface control document. 2018. (https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf).
8. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal (Version 2.1). 2016. (<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608523308843290.pdf>).

Поступила 5 августа 2019 г.

UDC 621.396

Universal ranging code generator of GNSS signals

© Authors, 2019
© Radiotekhnika, 2019

O.K. Mikhaylova – Student, Assistant, Laboratory of Navigation Systems,
National Research University «MPEI»
E-mail: mikhaylova-o-k@yandex.ru

I.V. Korogodin – Ph.D.(eng), Associate Professor, Department of Radio Systems, Leading Research Scientist,
Laboratory of Navigation Systems, National Research University «MPEI»
E-mail: korogodin@sms.ru

I.V. Lipa – Ph.D.(eng), Senior Research Scientist, Laboratory of Navigation Systems,
National Research University «MPEI»
E-mail: ivan1502@mail.ru

Abstract

This paper reviews PRN code generation methods for the existing GNSSs. We present the structure of the universal code generator which can be used in the satellite navigation systems: NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo, Beidou. The initialization parameters used for configuring this generator are presented. We also implemented the universal generator as a FPGA-based module and estimated hardware resource utilization.

Keywords

GNSS, GLONASS, GPS, Galileo, BeiDou, PRN, code generator, ranging code, pseudorandom sequence.

DOI: 10.18127/j00338486-201909(14)-04

References

1. *Perov A.I., Kharisov V.N.* GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya. Izd. 4-e, pererab. i dop. M.: Radiotekhnika. 2010. (in Russian)
2. *Shatilov A.Yu.* Kharakteristiki radiosignalov globalnykh sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem GLONASS, GPS, GALILEO, BEIDOU i funktsionalnykh dopolnenii SBAS. Izd-vo MEI. 2015. (in Russian)
3. GLONASS. Interfeisnyi kontrolnyi dokument. Navigatsionnyi radiosignal v diapazonakh L1, L2. 2010. (in Russian) (http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf).
4. Navstar GPS Space Segment/User Segment Interfaces, IS-GPS-200J. 2018. (<https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200J.pdf>).
5. Navstar GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces, IS-GPS-750. 2018. (<https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705E.pdf>).
6. GLONASS. Interfeisnyi kontrolnyi dokument. Navigatsionnyi radiosignal otkrytogo dostupa s kodovym razdeleniem v diapazone L3. 2016. (in Russian) (<http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKDL3-s-kod.-razd.-Red-1.0-2016.pdf>).
7. European GNSS (Galileo) open service signal-in-space interface control document. 2018. (https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf).
8. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal (Version 2.1). 2016. (<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608523308843290.pdf>).