

П. КОВАРЖ, П. КАЧМАРЖИК, Ф. ВЕЙРАЖКА

ПРОГРАММНЫЙ GPS/ГЛОНАСС/GALILEO-ПРИЕМНИК

Описывается архитектура мультисистемного приемника ГНСС, построенного на базе периферийной платы ExpressCard для стандартного персонального компьютера или ноутбука. В ППВМ приемника реализуется до ста универсальных корреляторов и выполняется захват и цифровая обработка сигналов. Приводится обзор характеристик настоящих и перспективных сигналов систем GPS, ГЛОНАСС и GALILEO для гражданских потребителей. Предлагается простая структура E-L-коррелятора ГНСС и описываются возможности его использования для обработки части сигналов ГНСС. Приводятся результаты испытаний коррелятора с сигналами E1 и E5a системы GALILEO, выводы.

Введение

Новейшим направлением в разработке ГНСС является совместная обработка сигналов разных систем [1]. Наличие общих свойств сигналов различных ГНСС упрощает устройство приемника и снижает его стоимость.

В настоящее время большинство приемников гражданского назначения работают только по сигналам GPS L1. Сигналы ГЛОНАСС с частотным разделением не находят столь широкого применения в основном из-за более высокой стоимости высокочастотной аппаратной части (front-end), более низкой производительности и недостаточного количества спутников ГЛОНАСС в недавнем прошлом. Однако эта ситуация быстро меняется и сейчас группировка космических аппаратов ГЛОНАСС почти укомплектована. Со своей стороны, Европейский Союз разрабатывает свою гражданскую ГНСС – GALILEO. В ближайшем будущем будет доступно для использования большое количество сигналов этой ГНСС. Высокоэффективный гражданский навигационный приемник сможет обрабатывать сигналы на многих несущих частотах, промодулированных различными способами. Проблема, стоящая перед разработчиками многосистемных приемников, состоит в том, что им приходится иметь дело с различными типами сигналов. Как следствие, усложняется устройство приемника и соответственно увеличивается его стоимость.

Поэтому разработчики ГНСС готовят и отчасти уже подготовили соглашения, касающиеся совместимости различных ГНСС. Соглашения, достигнутые к настоящему моменту, рассчитаны на использование общих частот и кодового разделения сигналов. Это позволяет использовать одну антенну и общую высокочастотную аппаратную часть для приема сигналов нескольких систем.

Коварж Павел. Кандидат технических наук, доцент Чешского технического университета (Прага).

Качмаржик Петр. Кандидат технических наук, доцент Чешского технического университета.

Вейражка Франтишек. Доктор технических наук, профессор Чешского технического университета.

Статья по докладу на XVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

Существующие системы ГНСС передают или будут передавать следующие сигналы на частотах L1 (1575,42 МГц) и L5 (1176,45 МГц):

- сигнал GPS L1, содержащий C/A код [2],
- сигнал GPS L5 [4] модернизированной системы GPS,
- сигнал GPS L1C с модуляцией типа TMBOC (Time Multiplexed Binary Offset Carrier) [3], основанной на BOC(1,1) (Binary Offset Carrier и BOC(6,1), который будет передаваться после следующего этапа модернизации GPS,
- сигналы ГЛОНАСС с кодовым разделением и модуляцией типа BOC(2,2) и (4,4) на частоте L1 и L5 соответственно [16],
- сигналы GALILEO с модуляцией типа MBOC (Multiplexed Binary Offset Carrier) на частоте L1 (E1) [7],
- сигналы GALILEO с модуляцией типа BPSK (Binary Phase-Shift Keying) на частоте E5a (идентичной L5).

Китайская система COMPASS [8, 9], вероятно, тоже будет передавать открытые для общего пользования сигналы на частоте L1, но технических данных по этим сигналам нет.

Таким образом, сигналы ГНСС передаются на одних и тех же частотах и используют один и тот же метод мультиплексирования, но модуляция, диапазон рабочих частот и кодировка сигналов различаются. В мультисистемном приемнике должны быть реализованы гибкие алгоритмы обработки этих сигналов ГНСС. Структура программного приемника идеально подходит для этой цели с учетом возможности модернизации алгоритмов или изменения характеристик сигналов.

Полоса пропускания большинства упомянутых сигналов гораздо шире, чем полоса используемого в настоящее время сигнала GPS L1 C/A, поэтому непосредственная обработка реализаций сигналов наталкивается на серьезные проблемы. Ядром каждого приемника ГНСС является коррелятор. Он обычно программируется и внедряется в ППВМ или специализированную интегральную схему программного приемника.

Цель работы – анализ корреляторов, пригодных для применения в перспективных мультисистемных ГНСС-приемниках и использующих общие свойства сигналов.

Обзор сигналов ГНСС

В этом разделе собраны основные сведения о сигналах ГНСС для гражданских потребителей. Указывается тип модуляции, период и скорость передачи дальномерного кода, скорость передачи навигационных сообщений. Описание структуры сигналов китайской системы COMPASS не представляется возможным из-за отсутствия необходимой информации.

GPS

Навигационная система GPS в настоящее время передает сигнал L1 C/A для гражданских потребителей (табл. 1). С недавнего времени также передаются сигналы L2 C/A и L5 с модуляцией QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), но только частью спутников. Длительный процесс модернизации GPS предполагает реализацию новых совместно обрабатываемых гражданских сигналов L1C на частоте L1 с TMBOC-модуляцией [3].

Сигналы на частотах L1 и L5 отвечают условиям совместной обработки.

Таблица 1

Сигналы GPS для гражданских потребителей

Сигнал	Частота, МГц	Модуляция	Скорость передачи дальномерного кода, кбит/с	Длина дальномерного кода, бит	Скорость передачи навигационных данных, бит/с	Примечание
L1 C/A	1 575.42	BPSK	1 023	1 023	50	Доступен в настоящее время
L2 C/A	1 227.60	BPSK	511.5	10 230	25	Передается не всеми спутниками, достоверность не гарантирована
			511.5	767 250	без данных («пилотная составляющая»)	
L5	1 176.45	QPSK	10 230	10 230	50	Передается только одним спутником, достоверность не гарантирована
				10 230	без данных («пилотная составляющая»)	
L1C	1 575.42	TMBOC	1 023	10 230	100	В настоящее время не передается

ГЛОНАСС

Спутники ГЛОНАСС М нового поколения передают два сигнала с частотным разделением в диапазоне L1 и L2 для гражданских потребителей (табл. 2) [16]. Ожидается, что космический сегмент будет заполнен в 2011 г. [6, 15].

Таблица 2

Сигналы ГЛОНАСС для гражданских потребителей

Сигнал	Частота, МГц	Модуляция	Скорость передачи дальномерного кода, кбит/с	Длина дальномерного кода, бит	Скорость канала данных, бит/с
L1*	1598.0625 ÷ 1605.375	BPSK	511	511	25
L2*	1242.9375 ÷ 1248.625	BPSK	511	511	25
L1 K**	1575.42	BOC(2,2)	2 046	Неизвестно	Неизвестно
L5 K**	1176.45	BOC(4,4)	4 092	Неизвестно	Неизвестно

Примечание: *L1, L2 – частотное разделение, спутники ГЛОНАСС М;

**L1K, L5 K – кодовое разделение, спутники ГЛОНАСС К.

Следующий этап модернизации, который находится в стадии подготовки (ГЛОНАСС К), связан с внедрением новых совместно обрабатываемых гражданских сигналов на частотах, соответствующих GPS L1 и GPS L5. Для обоих сигналов, которые далее обозначаются как L1K и L5K, будет использоваться кодовое разделение. Как и L1, L5 в GPS они удовлетворяют требованиям совместной обработки.

GALILEO

GALILEO – это европейская спутниковая навигационная система, находящаяся в процессе создания. Система будет передавать несколько видов сигналов (табл. 3) для различных навигационных служб [7]: открытые, бесплатные сигналы E1b, E1c и широкополосный сигнал E5 с альтернативной ВОС модуляцией (AltBOC). Широкополосный сигнал E5 можно обработать как один комбинированный сигнал, или отдельно по компонентам (табл. 3).

Составляющие сигнала E5aI (синфазная) и E5aQ (квадратурная) могут применяться для совместной обработки. Их поднесущая соответствует частоте GPS L5.

Т а б л и ц а 3

Гражданские сигналы GALILEO

Сигнал	Частота, МГц	Модуляция	Скорость передачи дальномерного кода, кбит/с	Длина дальномерного кода первичного/вторичного, бит	Скорость канала данных, бит/с	
E1b*	1575,42	MBOC	1 023	4 092/-	250	
E1c*		MBOC	10 230	4 092/25	без данных («пилотная составляющая»)	
E5	1191,795	AltBOC	10 230	10 230/4,20,100	50, 250	
E5**	E5aI	1156,45	QPSK	10 230	10 230/20	50
	E5aQ			10 230	10 230/100	без данных («пилотная составляющая»)
	E5bI	1207,14	QPSK	10 230	10 230/4	250
	E5bQ			10 230	10 230/100	без данных («пилотная составляющая»)

Примечание: *MBOC – комбинация BOC(1,1) и BOC(6,1);
**компоненты сигнала E5 с модуляцией AltBOC.

COMPASS

Китайская ГНСС COMPASS (Beidou-2) в настоящее время находится в стадии разработки. Документы с описанием ее сигналов еще не представлены. Запущено три спутника этой системы в тестовом режиме. Система будет поставлять несколько видов сигналов в полосе частот L-диапазона [7, 8].

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОРРЕЛЯТОР

Выше были даны характеристики сигналов, используемых в существующих и перспективных ГНСС, которые можно достаточно просто обработать в мультисистемном приемнике благодаря их общим свойствам. Однако в этих сигналах используются разные типы модуляции, что требует определенных усилий при разработке структуры коррелятора, способного обрабатывать данные сигналы.

В настоящем разделе предлагается структура так называемого универсального ГНСС-коррелятора, способного обрабатывать совместимые гражданские сигналы на частотах L1 и L5. Такой коррелятор должен быть пригоден для реализации в ППВМ.

Рассмотрим сначала общие свойства гражданских ГНСС-сигналов.

- Полоса пропускания сигналов на частоте L1 и L5 не превышает 20 МГц, или, точнее, основная часть спектра мощности этих сигналов находится в полосе такой ширины.
- Сигналы модулируются по методу BPSK, QPSK или BOC.
- Длина первичных кодов в большинстве случаев не превышает 10 230 бит.

Эти особенности позволяют унифицировать частоту дискретизации сигналов как минимум на уровне 40 МГц для сигнала промежуточной частоты и 20 МГц для сигнала основной полосы частот.

Структуру коррелятора тоже можно унифицировать. Можно использовать один или несколько E-L-корреляторов (рис. 1). Классический E-L-коррелятор предназначен для обработки сигналов с BPSK-модуляцией. QPSK-модуляцию можно разделить на две ортогональные BPSK-модуляции, поэтому QPSK-сигнал может быть обработан двумя E-L-корреляторами.

Сигналы с BOC-модуляцией также обрабатываются BPSK-коррелятором. При этом можно применить два метода.

Первый метод основывается на том, что BOC-модуляцию можно рассматривать как BPSK-модуляцию со скоростью, равной удвоенной частоте поднесущей; несущая модулируется по методу BPSK путем перемножения поднесущей и дальномерного кода. Этот метод имеет следующие недостатки.

1. Повышенные требования к памяти коррелятора, где хранится произведение дальномерного кода и поднесущей.
2. Проблема многоэкстремальности взаимно корреляционной функции.

Проблему, связанную с многоэкстремальным характером взаимной корреляционной функции, можно решить за счет использования следующего коррелятора, который отслеживает один экстремум, соответствующий огибающей корреляционной функции для BOC-модуляции. В этом случае дополнительный E-L-коррелятор обрабатывает сигнал с BPSK-модуляцией на поднесущей BOC.

Второй метод обработки сигнала с BOC-модуляцией особенно подходит для BOC-модуляции высокого порядка (частота поднесущей гораздо выше скорости передачи дальномерного кода). Используются два или четыре BPSK-коррелятора для обработки BPSK и соответственно QPSK-модулированных поднесущих и применяется специальное совместное управление этими корреляторами.

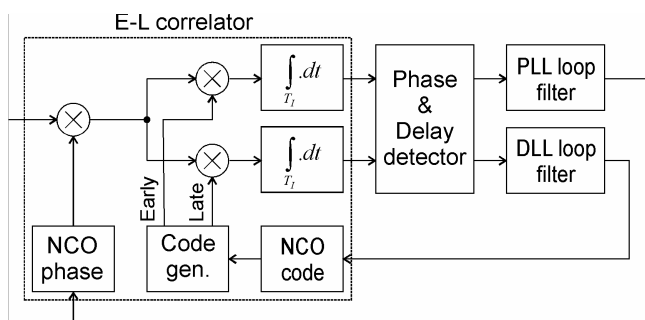


Рис. 1. E-L коррелятор для модуляции типа BPSK:

NCO (Number-Controlled Oscillator) – генератор с цифровым управлением; NCO phase/code – фаза/код NCO; Code gen. – генератор кода; Phase and Delay detector – детектор фазы и задержки; PLL/DLL – Phase/Delay Lock Loop - контур слежения за фазой/задержкой; PLL/DLL loop filter – фильтр контура PLL/DLL

В табл. 4 сведены возможные варианты применения универсального E-L (BPSK) с генератором кодов максимальной длиной 10 230 бит для обработки существующих и будущих гражданских сигналов GPS, ГЛОНАСС и GALILEO. Коррелятор применим для обработки сигналов GPS L1 C/A, L5, ГЛОНАСС L1 и L2 без ограничения. В сигнале GPS L2 используется временное разделение сигнала данных и измерительного сигнала, поэтому сигнал может обрабатываться предлагаемым коррелятором только частично. Коррелятор позволяет обрабатывать сигнал данных с дальномерным кодом длиной 10 230. Измерительный сигнал при этом не поддерживается.

Таблица 4

Сигналы ГНСС, подлежащие обработке универсальным коррелятором

Система	Сигнал	Возможность обработки	Число универсальных корреляторов	Примечание
GPS	L1 C/A	ДА	1	
	L2 C/A	Частично	1	Только канал передачи данных
	L5	ДА	2	
	L1C	Частично	2	Только компонент ВОС(1,1), компонент ВОС(6,1) обработке не подлежит
ГЛОНАСС	L1	ДА	1	
	L2	ДА	1	
	L1 K	Неизвестно	1 ÷ 4	Полная спецификация сигнала отсутствует
	L5 K	Неизвестно	2 ÷ 4	Полная спецификация сигнала отсутствует
GALILEO	E1b	ДА	1	Метод BPSK, только компонент ВОС(1,1), компонент ВОС(6,1) обработке не подлежит, проверено
	E1c	ДА	1	Метод BPSK, только компонент ВОС(1,1), компонент ВОС(6,1) обработке не подлежит, проверено
	E5	ДА	4	Две QPSK-поднесущие
	E5a	ДА	2	Проверено
	E5b	ДА	2	Проверено

Сигналы Galileo E5a и E5b с QPSK-модуляцией могут быть обработаны парой универсальных корреляторов без ограничения. Для обработки сигнала E5 требуется использование совместного управления корреляторами.

Можно обработать сигналы GALILEO E1b и E1c как сигналы BPSK. В таком случае компонент BOC(6,1) MBOC-модуляции исключается и обрабатывается только компонент BOC(1,1). Потеря от упрощения эквивалентна ухудшению отношения сигнал/шум примерно на 1 дБ [17]. Предполагается применять такую упрощенную схему обработки сигнала в недорогих приемниках GALILEO для массового потребителя.

Такая же проблема возникает при обработке BPSK модернизированного сигнала GPS L1C. Здесь BOC(1,1) обрабатывается, а BOC(6,1) – нет.

АРХИТЕКТУРА ПРИЕМНИКА

Описанный универсальный коррелятор был применен в двухчастотном приемнике, блок-схема которого показана на рис. 2. К преимуществам приемника относятся возможность установки большого числа корреляторов, его простота и низкая стоимость [13, 14].

Приемник представляет собой периферийное устройство формата ExpressCard для персонального компьютера (ПК) или ноутбука. В окончательной версии планируется оснастить приемник сотней универсальных корреляторов. Универсальные корреляторы программируются в недорогой ППВМ и управляются с помощью компьютера по шине PCIe. Она представляет собой широкополосный канал связи с малым временем задержки, который позволяет передавать реализации сигналов на компьютер для их цифровой обработки [12] в реальном времени. Приемник способен обрабатывать примерно 50 сигналов GPS, ГЛОНАСС и GALILEO на двух частотах.

В предлагаемом приемнике используются возможности современных ПК и ноутбуков для управления корреляторами, захвата сигнала и получения координат, скорости и времени потребителя.

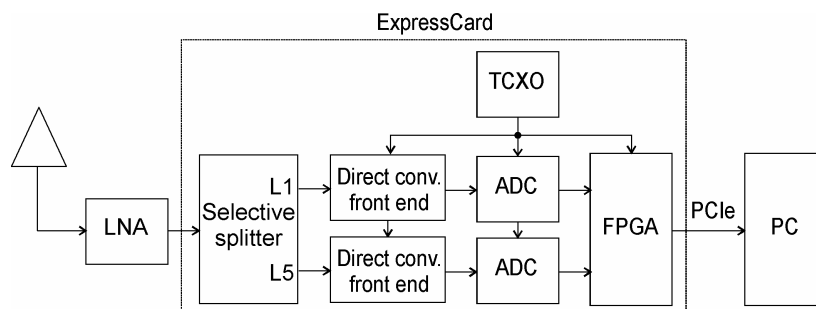


Рис. 2. Блок-схема приемника:

LNA (low-noise amplifier) – малозумяющий усилитель; Selective splitter – избирательный делитель частоты; TCXO (Temperature-compensated crystal oscillator) – термостабилизированный кварцевый генератор; ADC (analog-to-digital converter) – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); PC – ПК; FPGA – ППВМ; Direct conv. front end – прямой преобразователь

Предложенная архитектура приемника позволяет реализовать две традиционные схемы приемников ГНСС – обычная схема приемника с аппаратурно-реализуемыми корреляторами и блоком обнаружения сигналов и чисто программная схема, в которой сигналы обрабатываются непосредственно в микро-

процессоре. Главное преимущество предложенной архитектуры – это его универсальность и эксплуатационная гибкость.

Предполагается, что основное применение предлагаемый приемник найдет в образовательно-исследовательской области. Планируется использовать приемник и в системах железнодорожной сигнализации. Приемник позволяет реализовать специальные алгоритмы обработки сигналов и данных для обеспечения безопасности на железной дороге, обнаружения и подавление искусственных помех, подавление переотраженных сигналов и т.д. Для этих приложений приемник должен управляться промышленным компьютером или каким-либо другим контроллером посредством шины PCI Express bus.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КОРРЕЛЯТОРА

Универсальный коррелятор успешно прошел испытания в качестве элемента экспериментального программного приемника [11]. При этом тестовые сигналы ГНСС вырабатывались векторным генератором сигналов.

В ходе испытаний определялось среднеквадратическое отклонение (СКО) шума измерения псевдодальности. Их значения в зависимости от мощности сигнала приведены в табл. 5 для сигналов GALILEO E1b, E1c и в табл. 6 для сигнала E5a.

Полученные результаты подтвердили ожидаемые показатели.

Таблица 5

Среднеквадратическое отклонение шума кодовых измерений псевдодальности для E1b, E1c

Мощность сигнала, дБ Вт	СКО, м	СКО сдвига кода, бит
-143	0,948221	0,003233
-148	1,374286	0,004686
-153	2,351882	0,008020
-156	3,040095	0,010367
-159	3,926058	0,013388

Таблица 6

Среднеквадратическое отклонение шума кодовых измерений псевдодальности для E5a

Мощность сигнала, дБ Вт	СКО, м	СКО, бит
-143	0,127433	0,004345
-148	0,219645	0,007490
-153	0,385306	0,013139

Выводы

Соглашения о совместной обработке сигналов, заключаемые между разработчиками ГНСС, упрощают и удешевляют мультисистемные приемники будущего. Большинство существующих и планируемых к внедрению сигналов ГНСС можно обработать простым E-L-коррелятором с генератором кода длиной 10 230 бит. Это обстоятельство, а также использование кодового разделения сигналов и унификация частот позволяют создавать очень дешевые мультисистемные приемники.

Функциональные возможности предлагаемого универсального коррелятора были протестированы на сигналах GALILEO E1b, E1c и E5a. Предложена архитектура недорогого мультисистемного ГНСС-приемника, разработанного в Чешском техническом университете в г. Прага.

Данная работа выполнена при поддержке гранта MSM 6840770014 «Исследования в области перспективных информационных технологий» министерства образования, молодежи и спорта Чешской республики.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hein, G.**, GNSS Interoperability: Archiving of Global System of Systems or “Does everything Have to be the Same”, InsideGNSS Jan/Feb 2006, pp. 57-60.
2. **Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces**, IS-GPS-200D, on-line at http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/IS-GPS-200D_w_IRN_1_7Mar06%20NS.pdf.
3. **GPS L1 Civil Signal Modernization (L1C)**, on-line at <http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/L1/L1C-report-long.pdf>.
4. **Navstar GPS Space Segment/User Segment L1C Interfaces**, Draft IS-GPS-800, 19 April 2006, on-line at http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/L1/IS-GPS-800_19_DRAFT_Apr06.pdf.
5. **Navstar GPS Space Segment / User Segment L5 Interfaces**, IS-GPS-705, on-line at <http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization/Number.pdf>.
6. **GLONASS ICD version 5.0**, Moscow 2002, on-line at http://www.glonass-ianc.rsa.ru/i/glonass/ICD02_e.pdf.
7. **Galileo Open Service**, Signal In Space Interface Control Document, OS SIS ICD, Draft 1, European Space Agency / European GNSS Supervisory Authority 2008. On-line at <http://www.gsa.europa.eu/go/galileo/os-sis-icd#Register>.
8. **Gibbons, G.** China GNSS 101. Compass in the Review Mirror, InsideGNSS Jan/Feb 2008, pp. 62-66.
9. **Gao, G. X., Gen, A., Lo, S., Lorenzo, D., and Enge, P.** GNSS over China, the Compass MEO Satellite Codes, InsideGNSS Jul/Aug 2007, pp 36-43.
10. **Kovář, P., Vejražka, F., and Seidl, L., Kačmařík, P.**, Reception of Signals of GLONASS System by Experimental GNSS Receiver, Proc. of 11th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg 2004, pp. 210-212.
11. **Kovář, P., Vejražka, F., Seidl, L., and Kačmařík, P.**, Experimental Software Receiver of Signals of Satellite Navigation Systems, 11th IAIN World Congress on Smart Navigation - Systems and Services, Berlin 2003.
12. **Kovář, P., Vejražka, F., Seidl, L., and Špaček, J.**, Fast Acquisition of the GLONASS Signal, Proc. of Jubilee 15th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, State Research Center of Russia Elektropribor, Saint Petersburg 2008, pp. 357-362.
13. **Kovář, P., Kačmařík, P., Vejražka, F.**, Universal Front End for Software GNSS Receiver, Proc. of 13-th IAIN World Congress [CD-ROM]. Bergen: Nordic Institute of Navigation, 2009, p. 1-6.
14. **Špaček, J. and Puričér, P.**, Front-end Module for GNSS Software Receiver, Proc. of ELMAR 2006, Zadar: Croatia Society Electronics in Marine – ELMAR, 2006, p. 211-214.
15. **Revnivkykh, S.**: Global Navigation Satellite System (GLONASS). In Proceedings of 13-th International Association of Institutes of Navigation World Congress. 27-30 October, 2009, Stockholm
16. **Gibbons, G.**: Russia Approves CDMA Signals for GLONASS, Discussing Common Signal Design. InsideGNSS. April 28, 2008.
17. **Hein, G.; Rodriguez, J.; Betz, J. Hegarty, Ch.; Rushanan, J.; Kraay, A.; Pratt, A.; Lenahan, L.; Owen, J.; Issler, J. Stansell, T.**: MBOC, The New Optimized Spreading Modulation Recommended for Galileo L1 OS and GPS L1C. InsideGNSS. May/June 28, 2006.

Abstract. The new and modernized GNSS navigation systems will provide various navigation services and signals for civil user. The system operators work on basic interoperability agreements which simplify multi system navigation receiver architecture and reduce its cost. The most current GNSS signals of GPS, GLONASS and GALILEO can be processed by the one or several classical E-L correlators with a look up table PRN generator of length 10 230 chips.