

А. В. П е л ь т и н

**РЕТРАНСЛЯТОР СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ  
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
С МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫМ ПИЛОТ-СИГНАЛОМ**

*Рассмотрены особенности применения ретранслятора сигналов ГНСС в системах измерения параметров траектории подвижных объектов. Проведен анализ основных свойств сигналов ретранслятора с мультипликативным пилот-сигналом.*

**E-mail: peltosha@mail.ru**

**Ключевые слова:** спутниковые радионавигационные системы, широкополосный аналоговый ретранслятор, корреляционная функция.

В работах [1–3] рассмотрен ретранслятор сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) ГНСС для систем внешнетраекторных измерений подвижных объектов, проведены синтез и анализ алгоритмов комплексной обработки прямых и переизлученных сигналов ГНСС. В работах [1, 2, 4] выполнен сравнительный анализ характеристик систем измерения параметров движения объектов с ретранслятором и на основе бортовой навигационной аппаратуры потребителей (НАП), указан ряд преимуществ систем с ретранслятором по сравнению с альтернативными методами траекторных измерений при использовании сигналов ГНСС. Однако как в отечественных, так и в зарубежных публикациях рассматривается, как правило, широкополосный аналоговый ретранслятор с аддитивным пилот-сигналом (АПС). При этом пилот-сигнал (ПС) (в виде немодулированной синусоиды либо широкополосный фазокодоманипулированный (ФКМ) сигнал) формируется в ретрансляторе и аддитивно накладывается на переизлучаемые сигналы НКА. Основная функция такого ПС – получение в аппаратуре наземного измерительного пункта (НИП) информации о псевдодоплеровском сдвиге частоты несущей, обусловленном движением объекта относительно НИП и нестабильностью опорного генератора (ОГ) ретранслятора. Однако при комплексной обработке прямых и ретранслированных сигналов НКА наблюдение ПС в аппаратуре приема ретранслированных сигналов (АПРС) не является обязательным. Так, в работе [5] приведен одноэтапный алгоритм обработки прямых и переизлученных сигналов НКА при использовании стационарных ретрансляторов без ПС для организации локальной дифференциальной подсистемы (ДПС). При этом для различения в АПРС сигналов разных ретрансляторов и прямых сигналов НКА использовалось частотное разделение.

В общем случае в рамках метода широкополосной аналоговой ретрансляции можно рассматривать следующие схемы ретрансляторов:



Рис. 1. Структура ретранслятора с МПС

- широкополосный аналоговый без ПС;
- широкополосный аналоговый с АПС;
- широкополосный аналоговый с мультипликативным ПС (МПС).

Схему ретранслятора с МПС (рис. 1) можно рассматривать как естественное расширение его схемы с АПС. В этом случае основная функция МПС – разделение (структурное) переизлученных сигналов НКА относительно сигналов других ретрансляторов или прямых сигналов НКА (подобно тому как это делается в ретрансляторе с АПС за счет частотного разделения).

Так же, как и в работах [1–3], будем полагать, что в ретрансляторе используется ПС в виде широкополосного ФКМ сигнала.

Использование МПС позволяет расширить функциональные возможности ретранслятора. Во-первых, в этом случае появляется возможность одновременной работы по сигналам нескольких ретрансляторов (за счет кодового разделения сигналов по МПС), причем частотный план всех ретрансляторов при этом будет *одинаковым* (различие заключается только в структуре кода МПС). Это актуально как при использовании нескольких стационарных ретрансляторов в качестве опорных радионавигационных точек для организации локальной ДПС [2, 6], так и при одновременной работе по сигналам нескольких ретрансляторов в системах измерений параметров траектории динамичных объектов. Во-вторых, такой ретранслятор может переизлучать сигналы НКА в один из стандартных диапазонов, используемых в ГНСС (например, из поддиапазона L1 в поддиапазон L2 или L3). Это, в частности, позволяет упростить построение АПРС на базе серийно выпускаемой НАП и отказаться от дополнительного блока преобразования частоты ретранслированных сигналов НКА [7]. Таким образом, применение ретранслятора с МПС позволяет достичь максимальной унификации с существующими и разрабатываемыми образцами НАП. Так же, как и аддитивный ПС, МПС можно использовать для передачи дополнительной телеметрической информации.

**Характеристики сигналов ретранслятора с МПС.** Рассмотрим некоторые особенности моделей сигналов ретранслятора с МПС. С учетом линейности тракта ретранслятора и *аддитивного* характера смеси сигналов НКА ГНСС и шума, ретранслированный сигнал  $i$ -го НКА в момент приема на входе антенны АПРС в системной шкале времени запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{\Sigma i}(t) = \\ = A_{\Sigma i} G_{\text{дк}i}(t - \tau_{\Sigma i}(t)) G_{\text{нс}i}(t - \tau_{\Sigma i}(t)) G_{\text{ПС}}(t - \tau_p(t)) \cos(\Phi_{\Sigma i}(t - \tau_p(t))), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $G_{\text{дк}i}(t)$  — последовательность дальномерного кода  $i$ -го НКА;  $G_{\text{нс}i}(t)$  — последовательность навигационных символов  $i$ -го НКА;  $G_{\text{ПС}}(t)$  — кодовая последовательность МПС ретранслятора;  $\tau_{\Sigma i}$  — задержка ретранслированного сигнала  $i$ -го НКА;  $\tau_p$  — задержка МПС на трассе “ретранслятор–АПРС”.

Из выражения (1) следует в частности, что при обработке одного ретранслированного сигнала НКА необходимо оценивать два в общем случае *независимых* параметра — псевдозадержку  $\tau_{\Sigma i}$  и псевдозадержку  $\tau_p$ .

Рассмотрим для сигнала (1) следующую *двумерную* параметрическую корреляционную функцию:

$$\begin{aligned} \rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}, \varepsilon_{\tau_p}, \Delta_\tau) = \\ = \int G_{\text{дк}i}(u - \tau_{\Sigma i}) G_{\text{ПС}}(u - \tau_p) G_{\text{дк}i}(u - \hat{\tau}_{\Sigma i}) G_{\text{ПС}}(u - \hat{\tau}_p) du = \\ = \int G_{\text{дк}i}(v) G_{\text{дк}i}(v - \varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}) G_{\text{ПС}}(v - \Delta_\tau) G_{\text{ПС}}(v - \Delta_\tau - \varepsilon_{\tau_p}) dv, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}} = \tau_{\Sigma i} - \hat{\tau}_{\Sigma i}$ ;  $\varepsilon_{\tau_p} = \tau_p - \hat{\tau}_p$ ;  $\Delta_\tau = (\tau_{\Sigma i} - \tau_p) \bmod (\min(\tau_{ei}, \tau_{ep}))$ ;  $\tau_{ei}, \tau_{ep}$  — длительность элементов кодовых последовательностей  $G_{\text{дк}i}(t)$  и  $G_{\text{ПС}}(t)$  соответственно.

В выражении (2)  $\Delta_\tau$  рассматривается как параметр в том смысле, что в общем случае при разных значениях  $\Delta_\tau$  форма функции  $\rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}, \varepsilon_{\tau_p}, \Delta_\tau)$  будет различной. Вид функции (2) будет, в частности, определять характеристики дискриминаторов радионавигационных параметров (РНП) ретранслированных сигналов НКА (1). Для анализа характеристик функции  $\rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}, \varepsilon_{\tau_p}, \Delta_\tau)$  были проведены численные расчеты для кодовых последовательностей некоторых типов.

На рис. 2 приведена нормированная функция  $\rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}, \varepsilon_{\tau_p}, \Delta_\tau)$  для случая, когда  $G_{\text{дк}i}(t)$  является кодом стандартной точности, применяемым в ГНСС GPS, а  $G_{\text{ПС}}(t)$  — кодом стандартной точности, используемым в ГНСС ГЛОНАСС.

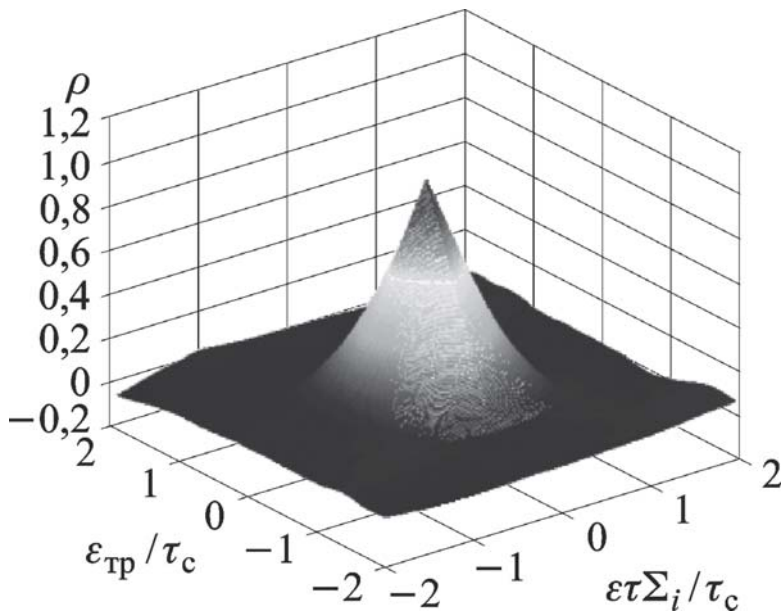


Рис. 2. Двумерная корреляционная функция

Методом численного расчета во всем диапазоне значений переменной  $\Delta_\tau$  было установлено, что в этом случае форма корреляционной функции *не зависит* от значений  $\Delta_\tau$  и определяется только параметрами самих кодовых последовательностей. Аналогичную форму функция  $\rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma_i}}, \varepsilon_{\tau_p}, \Delta_\tau)$  имеет для любых двух ФКМ сигналов с *некратными* частотами кодовых последовательностей.

На рис. 3, а, 3, б и 3, в приведены нормированные функции  $\rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma_i}}, \varepsilon_{\tau_p}, \Delta_\tau)$  для случая, когда  $G_{\text{дк}i}(t)$  и  $G_{\text{ПС}}(t)$  являются двумя различными кодами стандартной точности ГНСС GPS, соответствующим двум разным НКА.

Из приведенных графиков следует, что для разных кодовых последовательностей с равными тактовыми частотами (длительностью символа кода) форма двумерной корреляционной функции сильно зависит от параметра  $\Delta_\tau$ , т.е. от взаимного временного сдвига последовательностей  $G_{\text{дк}i}(t)$  и  $G_{\text{ПС}}(t)$ . Причем при  $\Delta_\tau \neq 2$  и  $\Delta_\tau \neq 0$  функция  $\rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma_i}}, \varepsilon_{\tau_p}, \Delta_\tau)$  становится несимметричной. В общем случае значение временного смещения  $G_{\text{дк}i}(t)$  относительно  $G_{\text{ПС}}(t)$  при ретрансляции может быть произвольным и меняться по времени. Таким образом, при изменении параметра  $\Delta_\tau$  форма корреляционной функции является нестационарной, что приведет к ухудшению характеристик дискриминаторов и алгоритмов обработки в целом. Это имеет место для любых двух ФКМ сигналов с *кратными* частотами кодовых последовательностей. Поэтому в ретрансляторе с МПС для получения стационарной функции  $\rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma_i}}, \varepsilon_{\tau_p}, \Delta_\tau)$  относительно параметра  $\Delta_\tau$  в ретрансляторе необходимо формировать кодовую последовательность с частотой, *не кратной* частоте кодовой последовательности каждого из переизлучаемых сигналов НКА ГНСС. Очевидно также, что кодовая последовательность для МПС должна отличаться от используемой в каждом из ретранслируемых сигналов НКА ГНСС.

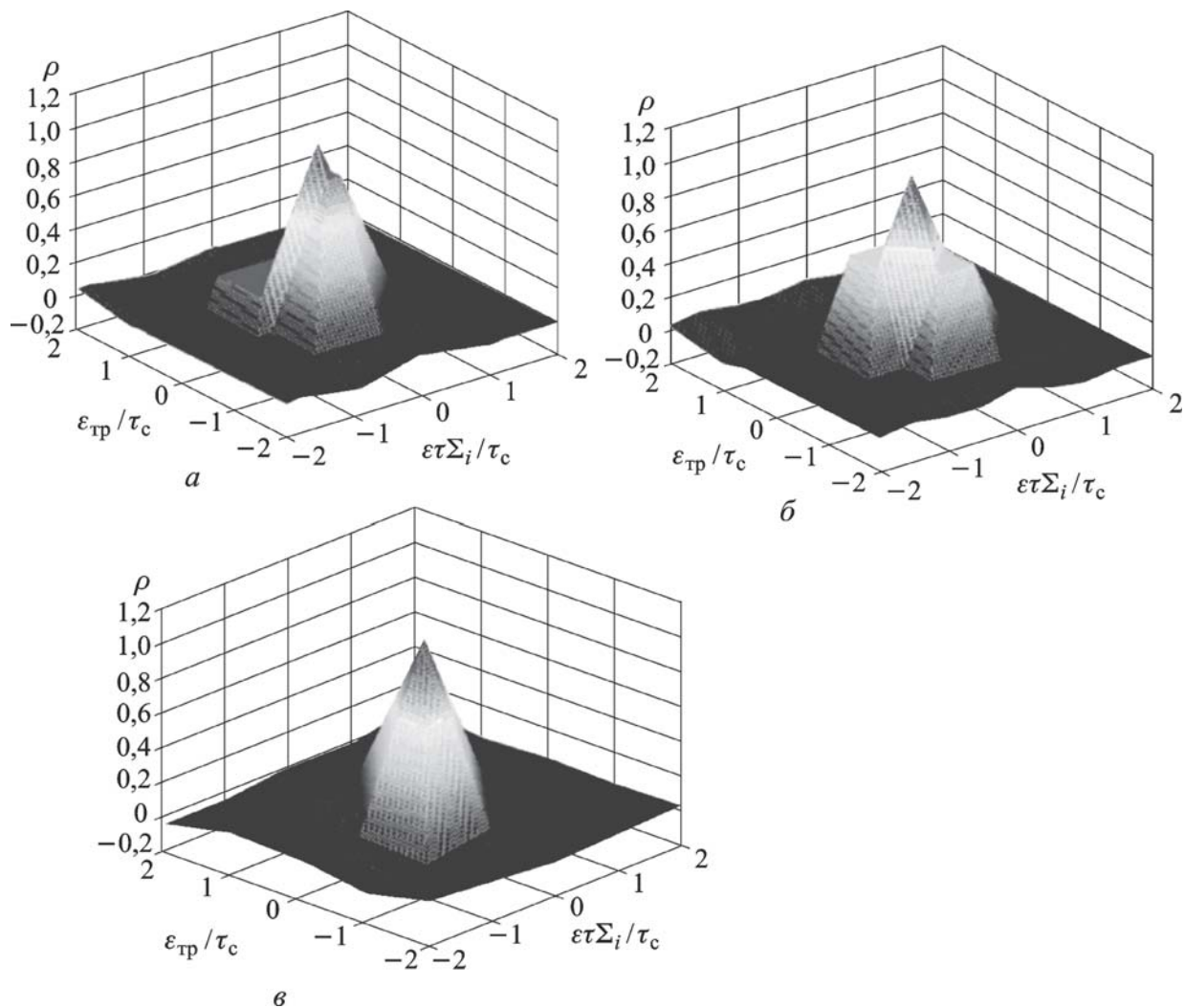


Рис. 3. Двумерная корреляционная функция при  $\Delta\tau/\tau_e = 0,83$  (а),  $0,25$  (б),  $0$  (в)

В качестве МПС можно использовать и так называемые сигналы *Binary Offset Carrier* (ВОС-сигналы). Как известно [8], спектр таких сигналов характеризуется минимумом на несущей частоте. На рис. 4 показаны спектры сигнала НКА на входе ретранслятора с МПС и ретранслированного сигнала НКА. В качестве МПС использован ВОС(2,1)-сигнал.

На рисунках видно, что сигнал ретранслятора с мультипликативным ВОС-ПС также имеет ослабление на центральной частоте, что фактически означает частичное замещение спектра сигнала НКА спектром МПС. Это, в частности, позволяет уменьшить влияние сигналов ретранслятора на прямые сигналы НКА в случае приема этих сигналов в одном поддиапазоне (например, переизлучение сигналов НКА в диапазон L2 при совместном приеме прямых сигналов НКА в диапазоне L2 на одной несущей частоте).

В таблице показаны результаты вычислений максимального относительного уровня взаимной корреляции сигналов ретранслятора для двух типов МПС (ПСП и ВОС(2,1)) и различных кодовых последовательностей, используемых в ГНСС.

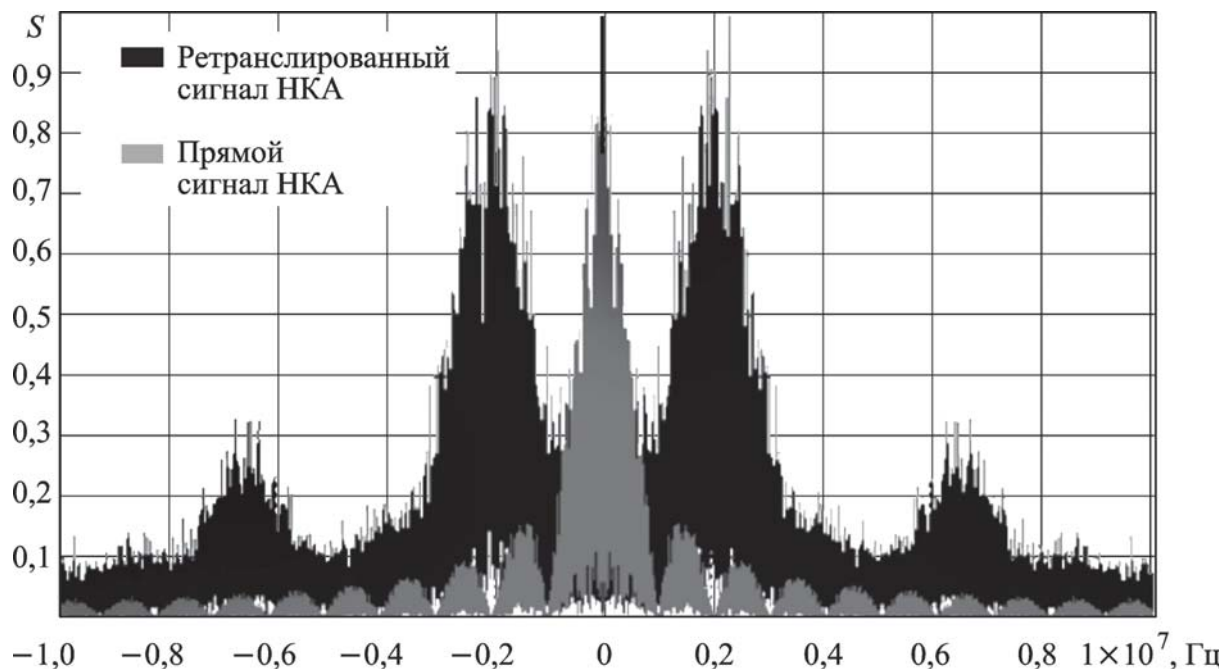


Рис. 4. Спектр сигналов ретранслятора

Ретранслированные сигналы НКА ГНСС	Прямые сигналы НКА ГНСС		
	ГЛОНАСС	GPS № 5	GPS № 10
ГЛОНАСС	$\frac{0,055}{0,016}$	$\frac{0,050}{0,022}$	$\frac{0,062}{0,014}$
	$\frac{0,061}{0,021}$	$\frac{0,060}{0,020}$	$\frac{0,057}{0,017}$
GPS № 5	$\frac{0,058}{0,018}$	$\frac{0,060}{0,023}$	$\frac{0,057}{0,019}$

Примечание. В числителе приведены значения в случае применения ПСП в качестве МПС, в знаменателе – в случае применения ВОС(2,1)-сигнала.

Из приведенной таблицы следует, что уровень взаимной корреляции сигналов НКА и сигналов ретранслятора с МПС не превышает 0,06–0,07 (причем он уменьшается при использовании ВОС-сигналов), что сопоставимо с характеристиками, например, последовательностей Голда, применяемых в сигналах ГНСС GPS [9].

Численными методами установлено, что в случае некратных частот кодовых последовательностей МПС и сигналов НКА нормированная функция  $\rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}, \varepsilon_{\tau_p}, \Delta_{\tau})$  для ретранслированного сигнала  $i$ -го НКА с высокой степенью точности может быть описана следующим эмпирическим выражением:

$$\rho(\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}, \varepsilon_{\tau_p}) = \rho_i(\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}) \rho_p(\varepsilon_{\tau_p}) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}|}{\tau_{ei}}\right) \left(1 - \frac{|\varepsilon_{\tau_p}|}{\tau_{ep}}\right); & |\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}| \leq \tau_{ei}, |\varepsilon_{\tau_p}| \leq \tau_{ep}; \\ \approx 0; & |\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}}| > \tau_{ei}, |\varepsilon_{\tau_p}| > \tau_{ep}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\rho_i(\varepsilon_{\tau_{\Sigma i}})$  и  $\rho_p(\varepsilon_{\tau_p})$  — корреляционные функции сигналов  $i$ -го НКА и МПС ретранслятора соответственно.

**Заключение.** Исследованы характеристики переизлученных сигналов НКА ГНСС при использовании ретранслятора с МПС. Показано, что корректная обработка сигналов ретранслятора с МПС возможна при условии *некратности* частот кодовых последовательностей МПС и сигналов НКА.

Показано, что взаимокорреляционные свойства сигналов ретранслятора с МПС и сигналов НКА не хуже соответствующих характеристик сигналов, используемых в ГНСС.

Получено эмпирическое выражение (3), хорошо описывающее двумерную корреляционную функцию (2) сигнала ретранслятора с МПС в случае некратных частот кодовых последовательностей МПС и сигналов НКА. Формула (3) может быть использована при синтезе оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки сигналов ретранслятора с МПС.

*Автор выражает благодарность В.Б. Пудловскому за плодотворное обсуждение результатов статьи.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пудловский В. Б., Пельтин А. В. Одноэтапный алгоритм фильтрации траектории ретранслятора сигналов СРНС // Радиотехника – 2007. – № 7. – С. 91–101.
2. Пудловский В. Б., Пельтин А. В. Исследование характеристик систем, использующих ретранслированные сигналы СРНС // Радиооптические технологии в приборостроении: Сб. материалов V–VI Всеросс. науч.-техн. конф. г. Туапсе. 2008. – С. 60–62.
3. Пудловский В. Б., Пельтин А. В. Одноэтапный когерентный алгоритм фильтрации координат и скорости ретранслятора сигналов спутниковых радионавигационных систем // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. Спец. вып. “Радиолокация, спутниковая навигация и связь, радиоастрономия” 2009. – С. 158–166.
4. Пудловский В. Б. Сравнение потенциальной точности ВТИ на основе сигналов СРНС с ретрансляцией или бортовой АП // Радиооптические технологии в приборостроении: Тез. докл. III Науч.-техн. конф. г. Сочи. 2005. – С. 146.
5. Пудловский В. Б., Пельтин А. В. Использование наземного ретранслятора сигналов СРНС для высокоточных навигационных измерений // Радиооптические технологии в приборостроении: Сб. материалов V–VI Всеросс. науч.-техн. конф. г. Туапсе. 2008. – С. 115–118.
6. Пудловский В. Б., Пельтин А. В. Дифференциальная коррекция координат на основе одноэтапного алгоритма совместной обработки прямых и ретранслированных сигналов СРНС // Радиолокация, навигация и связь: Сб. трудов междунар. конф. Воронеж. 2008. – С. 2053–2060.
7. Аппаратура канала ретрансляции сигналов спутниковых радионавигационных систем для подвижных объектов / В.П. Михайлицкий и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. “Радиолокация, спутниковая навигация и связь, радиоастрономия”. – 2009. – С. 144–150.

8. Г Л О Н А С С. Принципы построения и функционирования/ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд., перераб и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
9. И н ф о р м а ц и о н н ы е технологии в радиотехнических системах: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / В.А. Васин и др.; Под ред. И.Б. Федорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 786 с.

Статья поступила в редакцию 29.02.2012



Антон Владимирович Пельтин родился в 1983 г., окончил в 2007 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор пяти научных работ в области спутниковой радионавигации.

A.V. Pel'tin (b. 1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Researcher of the Research Institute for Radio Electronic Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of a number of publications in the field of satellite radionavigation.