

**УДК 621.396.74**

**ББК 0571.5**

**M435**

**М. А. Межетов**

**Иркутск, Россия**

**С. В. Туринцев**

**Иркутск, Россия**

**Е. А. Серебренников**

**Иркутск, Россия**

**П. В. Никитич**

**Иркутск, Россия**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ  
АЭРОДРОМНЫМ ДВИЖЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ПРИЕМА  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОПРАВК ПОДВИЖНЫМИ  
АЭРОДРОМНЫМИ СРЕДСТВАМИ**

Рассмотрена проблема повышения точности спутникового позиционирования подвижных объектов на территории аэропорта путем приема данных от локальной контрольно-корректирующей станции. Для решения задачи предложено использование сигнала режима VDL-2 с 8-позиционной фазовой манипуляцией с дифференциальным кодированием. На основе полунатурного моделирования синтезированы схемы формирования и приема сигнала режима VDL-2.

**Ключевые слова:** функциональное дополнение GNSS, VDL-2, фазовая манипуляция с дифференциальным кодированием (D8PSK), приподнято-косинусоидальный фильтр, трибит, квадратурные составляющие.

**M. A. Mezhetov**

**Irkutsk, Russia**

**S. V. Turincev**

**Irkutsk, Russia**

**E. A. Serebrennikov**

**Irkutsk, Russia**

**P. V. Nikitich**

**Irkutsk, Russia**

**INCREASE OF EFFICIENCY OF AIRDROME TRAFFIC CONTROL ON  
THE BASE OF RECEIVING THE DIFFERENTIAL CORRECTIONS BY  
MOBILE AERODROME VEHICLES**

The authors consider the issue of increase of accuracy of satellite positioning of mobile objects within the aerodrome by receiving data from the local augmentation station. The use of a signal of VDL-2 mode with 8-position differentially encoded phase-shift keying can solve the problem. Using the HIL-simulation the diagrams of forming and receiving a signal of VDL-2 mode are synthesized.

**Key words:** GNSS augmentation system, VDL-2, differentially encoded phase-shift keying (D8PSK), raised cosine filter, tribit, quadrature components.

Согласно данным международной гражданской авиации, начиная с середины 1970-х годов, показатели роста воздушного движения возрастают вдвое каждые 15 лет. С одной стороны, это в значительной мере способствуют экономическому прогрессу мировой экономики, но, с другой стороны, это может привести к повышению риска безопасности полетов в обстоятельствах, когда их интенсивность будет опережать темпы роста нормативных и инфраструктурных процессов, необходимых для их поддержки. С целью удовлетворения все возрастающих потребностей в увеличении пропускной способности элементов воздушного пространства, как минимум при сохранении требований

к безопасности полетов, была разработана концепция по созданию и развитию глобальной аэронавигационной системы, которая в наиболее полном виде отражена в Doc 9750-AN/963 «Глобальный аэронавигационный план» (ГАНП) [Глобальный Аэронавигационный план на 2013–2028 гг. URL: [http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/9750\\_cons\\_ru.pdf](http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/9750_cons_ru.pdf)].

Одним из направлений, рассматриваемым ГАНП, являются операции в аэропортах, которые включают в себя несколько модулей, реализация которых запланирована на период 2013–2018 гг.

Так, модули В0-АРТА (Оптимизация схем захода на посадку, включая наведение в вертикальной плоскости) и В1-АРТА (Оптимизация доступа в аэропорты) направлены на решение задачи повышения пропускной способности ВПП за счет применения глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS).

GNSS создают глобальное и достаточно точное навигационно-временное поле. Однако GNSS присущ ряд существенных недостатков (низкая помехоустойчивость, влияние геометрического фактора, нарушение целостности, сбои в работе приемников, ухудшение точности при ионосферных возмущениях, высоком уровне солнечной активности и т. д.), что снижает эффективность их применения ввиду возможного значительного ухудшения характеристик, прежде всего точности определения координат подвижных объектов. Поэтому используются различные функциональные дополнения GNSS, позволяющие создавать требуемое по точности, надежности и зонам покрытия навигационно-временное поле, дополняющее поле GNSS [Скрыпник, 2015].

Примером является наземная система функционального дополнения (GBAS). В Российской Федерации в качестве GBAS выступает локально-корректирующая станция ЛККС-А-2000.

ЛККС-А-2000 обеспечивает передачу на воздушное судно блоков дифференциальных поправок в режиме VDL-2 в зоне радиусом не менее 37 км [Авиационная электросвязь. Том 3 Системы связи URL: [http://airspot.ru/book/file/585/an10\\_v3\\_cons\\_ru.pdf](http://airspot.ru/book/file/585/an10_v3_cons_ru.pdf); Скрыпник, 2014]. Передача дифференциальных поправок осуществляется по открытому каналу связи, что

может быть использовано для повышения точности определения местоположения любых подвижных объектов, находящихся в зоне действия ЛККС (рис. 1), в том числе и аэродромных подвижных средств, в рамках реализации таких модулей ГАНП, как:

В0-SURF (Безопасность и эффективность наземных операций (использование систем А-SMGCS уровней 1-2));

В1-SURF (Повышение безопасности и эффективности наземного движения (SURF, SURF IA и системы технического зрения с расширенными возможностями визуализации (EVS)).

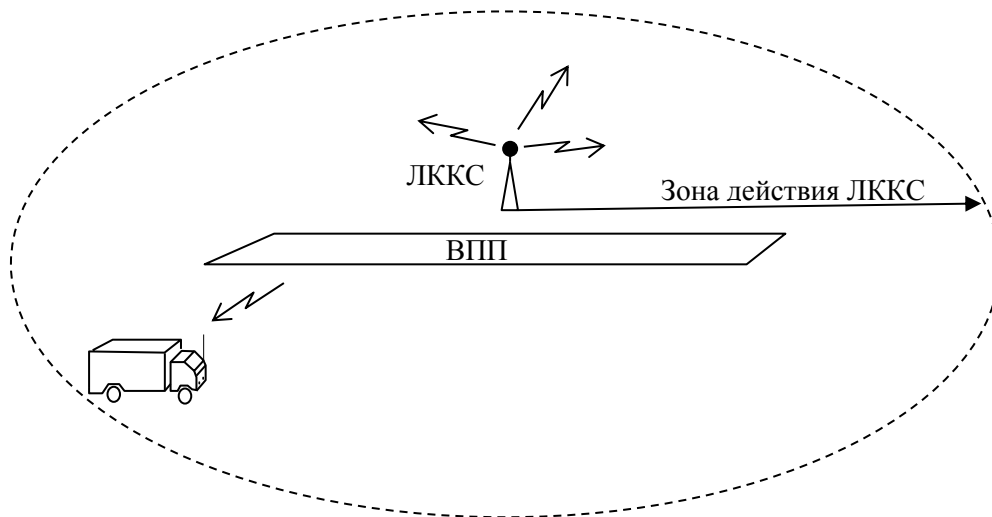


Рис. 1. Схема взаимодействия подвижных объектов с ЛККС

Для реализации задачи приема дифференциальных поправок на подвижном объекте должны быть установлены: радиоприемник УКВ диапазона, способный принимать сигнал режима VDL-2, и спутниковый навигационный приемник. Радиоприемник УКВ диапазона может быть реализован на базе технологии SDR (Software-defined radio).

Передающая часть ЛККС включает в себя устройство формирования сигнала VDL режима 2 и представлена на рис. 2. Сигнал режима VDL-2 представляет собой 8-позиционную фазовую манипуляцию с дифференциальным кодированием (D8PSK) с применением приподнято-косинусоидального фильтра [Вдовин, 2008].

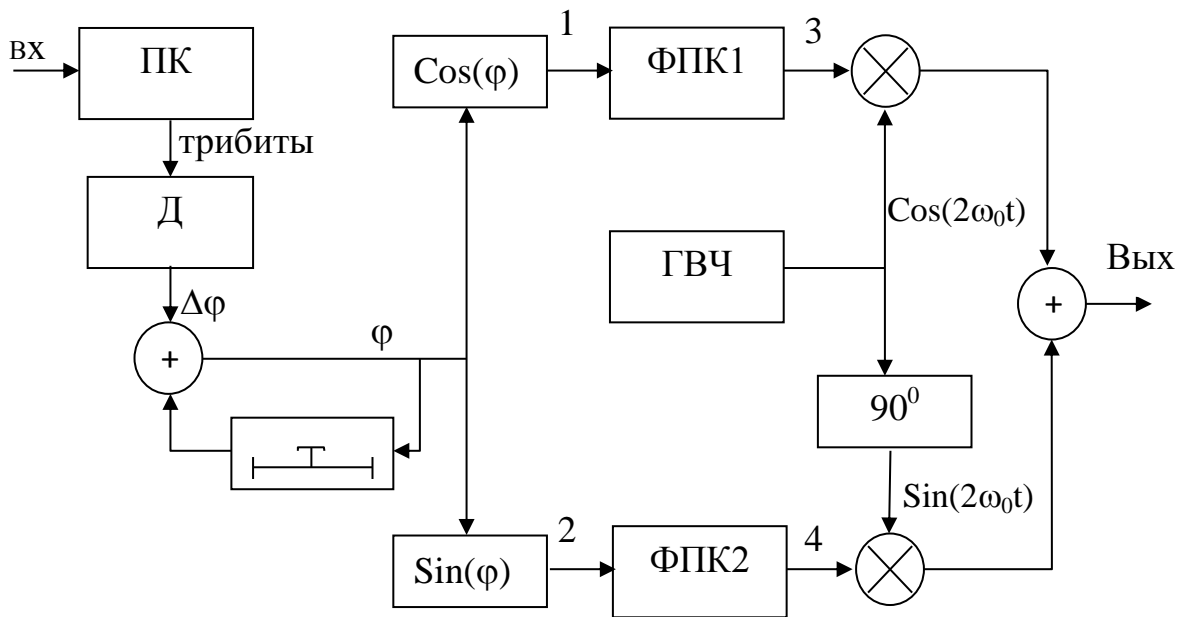


Рис. 2. Структурная схема формирователя D8PSK-сигнала

Подлежащий передаче поток данных в преобразователе кода (ПК) разбивается на группы по 3 последовательных бита данных (трибит). Каждому  $k$ -му трибиту в дешифраторе (Д) ставится в соответствие приращение фазового угла  $\Delta\varphi_k$  (табл. 1) [Авиационная электросвязь. Том 3 Системы связи URL: [http://airspot.ru/book/file/585/an10\\_v3\\_cons\\_ru.pdf](http://airspot.ru/book/file/585/an10_v3_cons_ru.pdf)]. Такая процедура снижает скорость цифрового потока в три раза, так как три информационных бита кодируются одним значением фазового угла.

Таблица 1

$X_k$	$Y_k$	$Z_k$	$\Delta\varphi_k$
0	0	0	$0\pi/4$
0	0	1	$1\pi/4$
0	1	1	$2\pi/4$
0	1	0	$3\pi/4$
1	1	0	$4\pi/4$

1	1	1	$5\pi/4$
1	0	1	$6\pi/4$
1	0	0	$7\pi/4$

Затем в накапливающем сумматоре, состоящем из линии задержки на длительность трибита и сумматора, происходит суммирование изменений фазы, в результате чего формируется полная фаза сигнала для k-го трибита [Скляр, 2003]:

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k.$$

В функциональных преобразователях «sin(φ)» и «cos(φ)» вычисляются квадратурные компоненты комплексной огибающей сигнала. Сформированный сигнал в точках 1 и 2 структурной схемы имеет вид последовательности дельта-функций с ограниченным набором нормированных значений амплитуды ( $\pm 0,7$ ;  $\pm 1$ ; 0). Импульсный сигнал поступает на формирующие фильтры с характеристикой «приподнятый косинус» (ФПК1, ФПК2) (рис. 3).

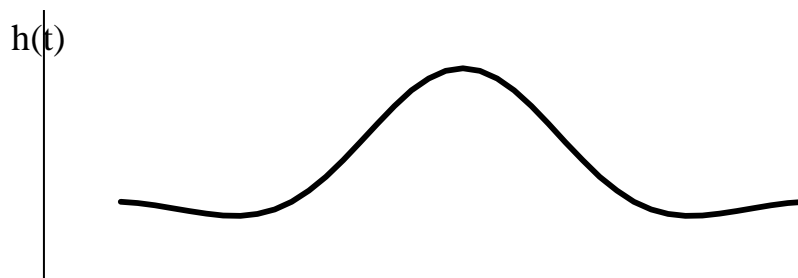


Рис. 3. Импульсная характеристика ФПК1, ФПК2

Эти предмодуляционные фильтры предназначены для формирования спектра радиосигнала заданной ширины [Скляр, 2003] с определенной формой его комплексной огибающей и имеют импульсную характеристику:

$$h(t) = \frac{\sin\left(\frac{\pi t}{T}\right)\cos\left(\frac{\pi \alpha t}{T}\right)}{\frac{\pi t}{T} \left[1 - \left(\frac{2\alpha t}{T}\right)^2\right]},$$

где T – период следования трибитов; α – коэффициент сглаживания, который принят равным 0,6 для систем, работающих в режиме VDL-2.

Оценка работоспособности схемы предмодуляционного формирователя сигнала (схемы на *рис. 2*) проводилась путем полунатурного моделирования с использованием программно-аппаратного комплекса National Instruments [Скрыпник, 2014] на примере формирования сигнала синхронизации и разрешения неоднозначности, который используется в ЛККС-А-2000 и представляет собой кодовое слово [Авиационная электросвязь. Т. 3. Системы связи URL: [http://airspot.ru/book/file/585/an10\\_v3\\_cons\\_ru.pdf](http://airspot.ru/book/file/585/an10_v3_cons_ru.pdf)]:

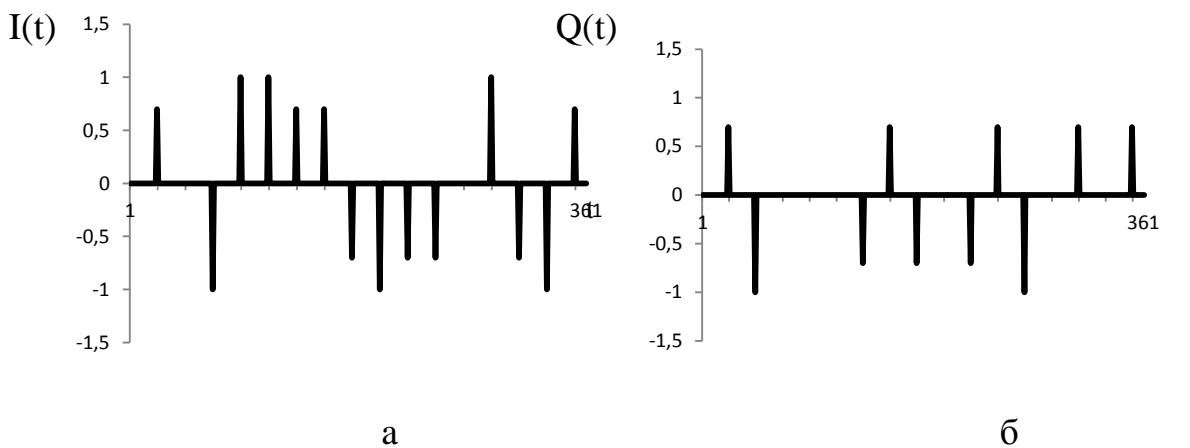
010001111101111110001100011101100000011110010000.

В преобразователе кода данное слово разбивается на трибиты (младший разряд передается первым):

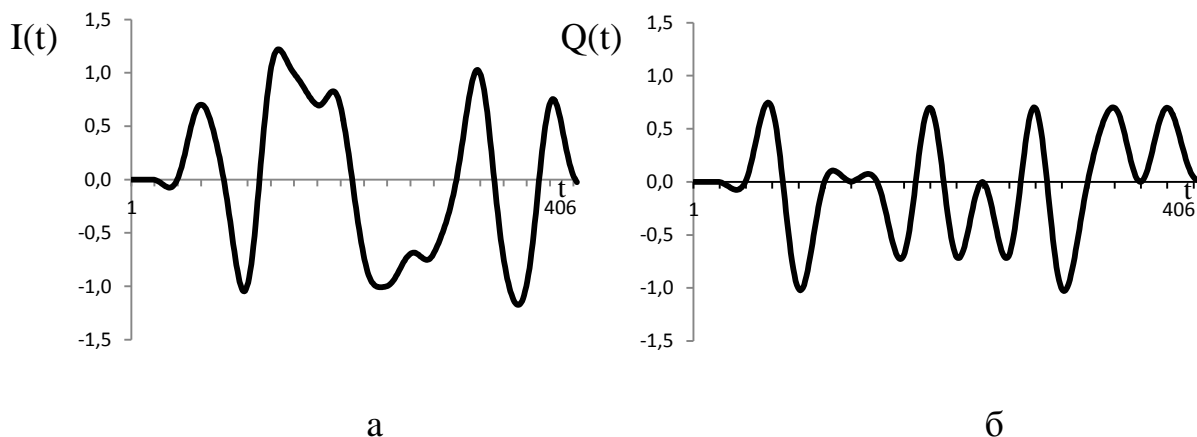
000 010 011 110 000 001 101 110 001 100 011 111 101 111 100 010.

Кодовое слово, преобразованное в последовательность дельта-функций (квадратурных компонент комплексной огибающей сигнала), представлено на *рис. 4*.

Сигналы с выходов ФПК1 и ФПК2 показаны на *рис. 5, а* и *5, б* соответственно.



*Рис. 4.* Осциллограммы в точках 1, 2 схемы формирователя D8PSK-сигнала



*Рис. 5.* Осциллограммы в точках 3, 4 схемы формирователя D8PSK-сигнала

Выходные напряжения с выходов фильтров подаются на квадратурный модулятор, который состоит из двух перемножителей, сумматора, генератора высокой частоты (ГВЧ) и фазовращателя на 90 градусов. Квадратурный модулятор переносит спектр частот на рабочую частоту авиационного УКВ диапазона.

Прием дифференциальных поправок на подвижном объекте осуществляется радиоприёмником УКВ диапазона. Один из возможных вариантов реализации приемника [Феер, 2000] режима VDL-2 представлен на *рис. 6*. В состав приемника входит: ПФ – полосовой фильтр; СВН – схема восстановления несущей; СВТЧ – схема восстановления тактовой частоты; К1, К2 – ключи; ФПК1, ФПК2 – фильтры с характеристикой «приподнятый косинус». Предлагаемая структура обеспечивает когерентный способ приёма сигнала, который предполагает восстановление несущей в приёмнике с точностью до фазы. Система восстановления несущего колебания может быть реализована с использованием различных принципов построения [Прокис, 2000], основанных на применении петли управляемой и неуправляемой решением. В приёмной аппаратуре VDL-2 для восстановления несущей применяется петля управляемая решением, которая упрощает реализацию СВН. Суть её работы заключается в следующем. В начале каждого пакета передаётся сигнал синхронизации и разрешения неоднозначности, значение которого известно на приёмной стороне. Задача СВН сводится к формированию такого сигнала восстановленной несущей, который на выходе ФПК1 и ФПК2 выдаст последовательность синхронизации и разрешения неоднозначности известные приёмнику. В этом случае считается, что несущая частота восстановлена правильно. Принятый сигнал переносится на нулевую промежуточную частоту и разделяется в перемножителях на квадратурные составляющие  $I(t)$  и  $Q(t)$ , которые поступают на фильтры ФПК1, ФПК2. Импульсные характеристики фильтров ФПК1, ФПК2 аналогичны импульсным характеристикам фильтров, используемым в формирователе.



СВТЧ предназначена для формирования тактовых импульсов, которые синхронизируют работу цифровых схем при обработке сигналов VDL режима 2, и служит для формирования отсчетных тактовых импульсов, которые обеспечивают взятие отсчетов сигнала на выходе согласованных фильтров (ФПК1, ФПК2) в моменты максимума отношения сигнал/шум. В процессе демодуляции цифровых сигналов необходима система тактовой синхронизации (ТС), которая должна обеспечить правильный выбор отсчетных моментов. Эта задача решается путем подстройки тактового генератора сигналом погрешности, формируемым специальным детектором. Существует несколько систем ТС: системы ТС с восстановлением фронтов; системы ТС с отстающим и опережающим отсчетами; система ТС с детектором погрешности Гарднера [Ивашенко, 2012]. В работе реализована система ТС с восстановлением фронтов. Для нормальной работы такой системы необходимо, чтобы данные, передаваемые по радиоканалу, предварительно подверглись операции скремблирования, которая устраняет длительные последовательности одинаковых символов, путем добавления к цифровому сигналу псевдослучайной последовательности. В системах VDL-2 применяется скремблер с образующим полиномом [Авиационная электросвязь. Т. 3. Системы связи URL: [http://airspot.ru/book/file/585/an10\\_v3\\_cons\\_ru.pdf](http://airspot.ru/book/file/585/an10_v3_cons_ru.pdf)]:

$$G(x) = 1 + x + x^{15}.$$

Скремблированные данные позволяют получить в системе ТС с восстановлением фронтов отклик сигнала на символьной частоте, который с точностью до фазы привязан к входным данным, поступающим на приёмник. Это позволяет точно отслеживать моменты тактирования ключей K1 и K2. СВТЧ управляет ключами K1 и K2 так, чтобы они открывались только в моменты времени поступления трибитов.

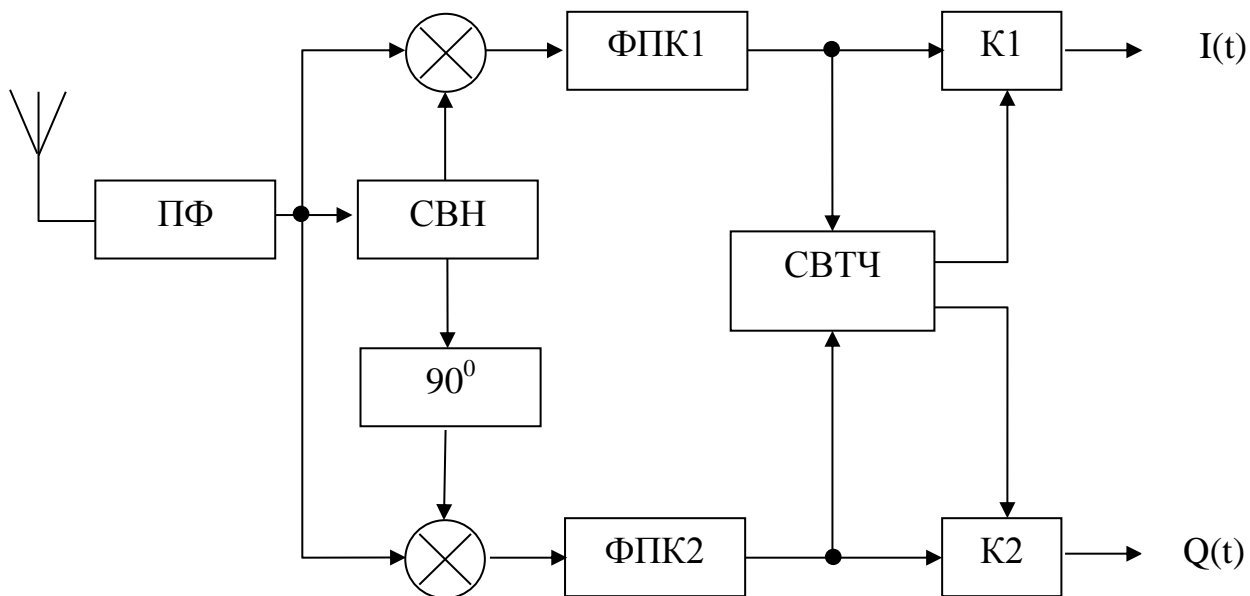


Рис. 6. Структура приемника режима VDL-2

Таким образом, результаты проведенного полунатурного моделирования показали работоспособность рассмотренных схем формирования и приема сигнала режима VDL-2. В приёмнике в СВН была применена петля, управляемая решением, а в СВТЧ система ТС с восстановлением фронтов. Предложенная схема приемника может быть использована в аппаратуре приема дифференциальных поправок на подвижных аэродромных средствах с целью повышения эффективности управления ими, путем повышения точности позиционирования.

### Библиографический список

1. Авиационная электросвязь. Т. 3 Системы связи // Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации, 2-е изд. 2007. 276 с. // [Электронный ресурс]. – 2007. URL: [http://airspot.ru/book/file/585/an10\\_v3\\_cons\\_ru.pdf](http://airspot.ru/book/file/585/an10_v3_cons_ru.pdf) (дата обращения: 22.01.2017).
2. Вдовин Л. М. Новые информационные технологии для автоматизированных систем управления воздушным движением / Л. М. Вдовин, С. А. Худяков // Научный Вестник Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики. 2008. № 2(5). С. 11–16.
3. Глобальный Аэронавигационный план на 2013–2028 гг. // Doc 9750-AN/963, 4-е изд. 2013. 128 с. // [Электронный ресурс]. – 2013. URL: [http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/9750\\_cons\\_ru.pdf](http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/9750_cons_ru.pdf) (дата обращения: 22.01.2017).
4. Иващенко П. В. Радиоавтоматика: учеб. пособ. к изучению дисциплины «Радиоавтоматика» / П. В. Иващенко, В. А. Голощапов. Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2012. 72 с.

5. *Прокис Джон* Цифровая связь / Пер с англ. / Под ред. Д. Д. Кловского. М: Радио и связь, 2000. 800 с.
6. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Изд. 2-е, испр. / Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
7. *Скрыпник О. Н.* Построение и анализ полей точности GPS на основе программно-аппаратных средств NI GPS SIMULATION TOOLKIT / О. Н. Скрыпник, Е. Е. Нечаев, Р.О. Арефьев // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 209(11). С. 5–12.
8. *Скрыпник О. Н.* Радионавигационные системы воздушных судов. М.: Инфра-М, 2014. 348 с.
9. *Скрыпник О. Н.* Экспериментальные исследования характеристик совмещенного GNSS приемника в высоких широтах / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев, Н. Г. Астраханцева // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221 (11). С. 35–42.
10. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. М.: Гадио и связь, 2000. 514 с.

## References

1. Aeronautical telecommunication. V. 3 Communication systems // Appendix 10 to Convention on International Civil Aviation, 2<sup>nd</sup> ed. 2007. 276 p. // [Electronic source]. – 2007. URL: [http://airspot.ru/book/file/585/an10\\_v3\\_cons\\_ru.pdf](http://airspot.ru/book/file/585/an10_v3_cons_ru.pdf) (accessed date: 22.01.2017).
2. *Vdovin L. M.* New IT for automated systems of ATC / L. M. Vdovin, S. A. Hudjakov // Bulletin of Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation. 2008. № 2(5). P. 11–16.
3. Global Air Navigation Plan for 2013–2028. // Doc 9750-AN/963, 4<sup>th</sup> ed. 2013. 128 p. // [Electronic source]. – 2013. URL: [http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/9750\\_cons\\_ru.pdf](http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/9750_cons_ru.pdf) (accessed date: 22.01.2017).
4. *Ivashhenko P. V.* Radio automation: textbook for the discipline « Radio automation » / P. V. Ivashhenko, V. A. Goloshhapov. Odessa: ONAC named after. A. S. Popov, 2012. 72 p.
5. *Proakis J.* Digital communications / Trans. from English / Eds. D.D. Klovsky. M: Radio and communication, 2000. 800 p.
6. *Sklyar B.* Digital communications. Theoretical basis and practical application / Ed. 2<sup>nd</sup>, cor. / Trans. from English. M.: Publishing house «Williams», 2003. 1104 p.
7. *Skrypnik O. N.* Skrypnik O. N. Construction and analysis of GPS precision fields on the basis of hardware-software NI GPS Simulation Toolkit. / O. N. Skrypnik, E. E. Nechaev, R. O. Arefev // Scientific bulletin of the Moscow state technical university of civil aviation, 2014, №209, pp.5-12.
8. *Skrypnik O. N.* Radio navigational systems of aircrafts. M.: INFRA-M, 2014. 348 p.

9. *Skrypnik O.N.* Experimental research of combined GNSS receiver characteristics in high latitudes / O. N. Skrypnik, R. O. Arefev, N. G. Astrahanceva // Scientific bulletin of the Moscow state technical university of civil aviation,, 2015, №221(11), pp. 35–42.

10. *Feer K.* Wireless digital communications. M.: Radio and Communication, 2000. 514 p.