

УДК 621.396.98.004.1

ТЕНДЕНЦИИ СПОСОБОВ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ И ПОСАДКИ

В.И. БАБУРОВ¹, Т.Б. ГАЛЬПЕРИН¹, А.А. РОГОВА¹, О.И. САУТА¹

¹АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»,
г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены достоинства и недостатки различных способов навигации. Приведено основное достоинство инерциального способа навигации, заключающееся в высокой помехоустойчивости. Приведен недостаток этого способа навигации, заключающийся в накоплении ошибок с течением времени. Обосновано преимущество спутниковых систем навигации с точки зрения их глобальности и высокой точности измерения. Рассмотрены недостатки и достоинства дальномерного способа навигации по сравнению со спутниковыми системами навигации. Приведены основные направления комплексирования спутниковых и радиолокационных средств навигации, а также спутниковых и инерциальных средств навигации. Предложены различные системы комплексного использования дальномерного способа навигации и спутниковых систем навигации. Подробно рассмотрены общие важные недостатки, присущие способам и системам по патентам. Приведены способы комплексирования инерциальной и спутниковой систем навигации в виде использования инерциальной системы в комплексе со спутниковым приемником в контурах авторегулирования фазы и частоты спутникового сигнала для повышения точности и непрерывности сигнала на выходе приемника, а также в виде использования спутникового способа с дифференциальным режимом для повышения точности инерциального способа путем коррекции сигнала на выходе инерциальной системы. Проведен анализ различных патентов на комплексные способы навигации.

Ключевые слова: спутниковая навигация, инерциальная навигация, дальномерный способ навигации.

ВВЕДЕНИЕ

В конце 90-х годов прошлого столетия начали развиваться направления комплексирования спутникового способа навигации (ССН) с ранее используемыми способами навигации – инерциальным способом навигации (ИСН) и радиолокационным дальномерным способом навигации (ДСН), которые оказались значительно менее точными по сравнению с ССН, но в то же время имеющими свои принципиальные достоинства и уже широко внедренными в авиационную аппаратуру.

При современных все возрастающих требованиях к точности, надежности и целостности систем навигации комплексирование различных по физическим принципам работы систем навигации становится первостепенной научно-технической задачей.

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ НАВИГАЦИИ

В инерциальном способе навигации (ИСН) определение пространственных координат ЛА осуществляется путем интегрирования навигационных параметров из показаний инерциальных датчиков, например, значений угловой скорости и ускорения [1, 2]. Основное достоинство этого способа заключается в высокой помехоустойчивости, а недостаток – в накоплении ошибок с течением времени. Поэтому ИСН требует периодической коррекции местоположения ЛА с комплексным использованием в первую очередь спутникового способа навигации. По ССН вычисление навигационных параметров ЛА осуществляется с использованием сигналов N навигационных спутников (НС), формирующих рабочее созвездие [3, 4]. Достоинством ССН является глобальность и высокая точность измерения. Недостатком является низкая помехоустойчивость и высокая с точки зрения безопасности полета вероятность отказа.

В дальномерном способе навигации (ДСН) вычисление навигационных параметров ЛА осуществляется с использованием сигналов L наземных радиомаяков (НРМ), формирующих рабочую группу.

Этот способ навигации уступает ССН в точности, но имеет преимущество в надежности и помехоустойчивости [5, 6].

Основные группы патентов в 2000–2014 гг., защищающие комплексные способы навигации, посвящены комплексированию:

- спутниковых и радиолокационных средств навигации,
- спутниковых и инерциальных средств навигации.

Рассмотрим кратко основные направления комплексирования первой группы. В данной группе среди радиолокационных средств к навигации относятся в первую очередь дальномерные системы навигации, использующие ДСН. Кроме того, можно указать на использование в числе радиолокационных средств при посадке – посадочный радиолокатор (ПРЛ).

Получившие широкое распространение радиосредства ближней радионавигации, реализующие дальномерный способ навигации, такие как международная дальномерная радиотехническая система DME, обеспечивают решение только части задачи, т. е. определение местоположения ЛА относительно стационарных наземных приемопередатчиков (радиомаяков), координаты которых заранее известны на борту ЛА.

При этом способе определения координат ЛА необходимо измерение расстояния до двух и более наземных радиомаяков, координаты которых заранее известны на борту ЛА, и требуется обеспечение связи с этими радиомаяками, т. е. несколько радиомаяков всегда должны находиться в зоне радиовидимости ЛА, что порой является затруднительным, учитывая дециметровый диапазон рабочих частот находящейся в эксплуатации дальномерной радиотехнической системы DME (960...1215 МГц). Такими же недостатками обладает и дальномерный канал отечественной радиотехнической системы ближней навигации РСБН (936...1000,5 МГц).

Кроме того, в дальномерной радиотехнической системе на точность определения координат ЛА оказывает значительное влияние геометрический фактор взаимного расположения ЛА и наземных радиомаяков [7].

Были предложены различные системы комплексного использования ДСН и ССН.

В патентах США [8–11] предлагается в бортовой вычислитель вводить навигационные параметры положения ЛА, которые соответствуют выходным данным существующих бортовых средств радионавигации – VOR, DME, TACAN, NDB (ненаправленные маяки). При этом используются идентификаторы этих систем и их координаты.

В патентах США [12–15] также используются данные ССН либо для повышения качества информации ДСН, либо для обеспечения встроенного контроля в системах DME.

Способам и системам по патентам [8–15] присущи общие важные недостатки.

1. Необходимость использования нескольких наземных радиомаяков (приемопередатчиков) для определения местоположения на борту данного ЛА.

2. Необходимость предварительного наличия на борту ЛА данных об абсолютных координатах приемопередатчиков, что увеличивает время предполетной подготовки или требует ввода данных непосредственно в процессе полета вручную.

СПОСОБЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАЛЬНОМЕРНЫХ И СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ

Эффективное совмещение ДСН и ССН защищено патентом «ВНИИРА-Навигатор» [16], где в радиотехнической системе ближней навигации (РСБН) в аппаратуру запросчика и ответчика введены спутниковые приемники. Это позволяет с помощью предложенной системы DME

определить местоположение ЛА при работе только с одним наземным радиомаяком (НРМ), ответчиком, абсолютные координаты которого заранее неизвестны. При этом увеличивается точность местоопределения, не требующая использования локальных контрольно-корректирующих станций (ЛККС), а также целостность и непрерывность получения навигационной информации на борту ЛА.

В комплексном способе навигации, реализованном в системе [16], производится относительное определение координат. В случае определения координат на запросчике и ответчике по одному и тому же рабочему созвездию спутников, коррелированные составляющие погрешности компенсируются [3, 16].

Дисперсия погрешностей координат $\sigma_{\Delta q}^2$, в предположении нормальности закона распределения, будет равна

$$\sigma_{\Delta q}^2 = \sigma_{q_{\text{сн}}}^2, \quad (1)$$

где $\sigma_{q_{\text{сн}}}^2$ – суммарная дисперсия случайных составляющих погрешности.

Практически в этом случае дисперсия определения координат будет совпадать с аналогичной дисперсией в дифференциальном режиме.

$$\sigma_{\Delta q}^2 = \sigma_{\Delta_{\text{диф}}}^2 \quad (2)$$

Кроме того, в такой системе возможно отсутствие на борту заранее неизвестных координат НРМ, что сокращает время предполетной подготовки. Появляется также возможность, благодаря определению относительных координат между ЛА, обеспечить создание единого локально-глобального навигационного поля с использованием преимуществ каждого из способов – ССН и ДСН.

Формирование комплексного способа на основе самостоятельного использования каждого из способов – ССН и ДСН, но объединенного совместной обработкой результатов, предложено в патенте «ВНИИРА-Навигатор» [17]. В данном способе производится корректировка навигационных параметров, определенных по ДСН, на основе ССН.

В общем случае используются N НС и L НРМ (рис. 1). При этом прием сигналов НС ведется как на борту ЛА, так и на НРМ.

По результатам комплексной обработки навигационных параметров производится корректировка сигналов управления частотно-временным режимом формирования последовательности запросных дальномерных сигналов (рис. 2). На рис. 2 приняты следующие сокращения: ДС – дальномерный сигнал, НП – навигационные параметры, ДП – дифференциальная поправка, ИС – информационный сигнал.

Наряду с запросным и ответным дальномерным сигналом вводятся запросный и ответный информационный сигнал для управления режимами в системе ДСН. Способ по [17] предусматривает определение координат ЛА по ССН в режиме навигации на маршруте с использованием информационных сигналов L НРМ. В режиме посадки используется только один НРМ у взлетно-посадочной полосы. Функции НРМ расширены, одновременно НРМ выполняет и роль ЛККС, при этом опорные и базовые координаты НРМ определяются и уточняются ССН. Дифференциальные поправки по ССН в режиме навигации определяются в виде координат, а в режиме посадки на ВВП, требующем большей точности, – в виде псевдодальностей.

Среди патентов, предлагающих комплексирование спутниковых и радиолокационных посадочных средств, укажем на патент «ВНИИРА-УВД», в котором предложена параллельная работа спутниковой системы и посадочного радиолокатора [18].

СПОСОБЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ И СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ

Одним из направлений такого совмещения является использование инерциальной системы (ИНС) в комплексе со спутниковым приемником в контурах авторегулирования фазы и частоты спутникового сигнала для повышения точности и непрерывности сигнала на выходе приемника [19].

Другое направление – использование спутникового способа с дифференциальным режимом для повышения точности инерциального способа путем коррекции сигнала на выходе инерциальной системы [20, 21].

Этот метод используется и для корректировки показаний гироскопа [23].

В ряде ситуаций, обусловленных нестандартными условиями приема спутниковых сигналов, например, при пропадании сигналов спутников из-за наличия частичных затенений приемной спутниковой антенны или вследствие крена и/или тангажа ЛА, точность спутниковых навигационных определений существенно падает. При некоторых значениях указанных факторов спутниковые местоопределения становятся невозможными, так как в зону радиовидимости спутниковой антенны ЛА попадает недостаточное количество НС.

В этих ситуациях также целесообразно комплексное использование спутникового и инерциального способов.

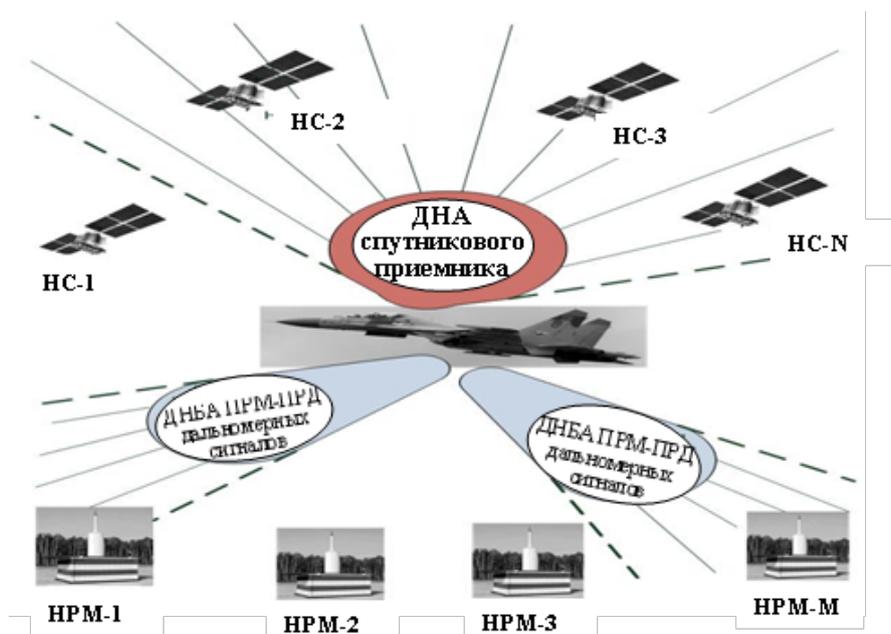


Рис. 1. Ориентация диаграмм направленности бортовых антенн (ДНБА) ЛА спутниковой и дальномерной навигационных систем

В упомянутых выше работах при комплексировании данных от спутниковой системы и инерциальных датчиков информация от спутниковой системы используется при любом составе рабочего созвездия. Координаты и скорости их изменения определяются в результате совместной обработки всей имеющейся информации, поступающей от спутников и от инерциальных датчиков.

Однако из-за изменения угловой ориентации ЛА, особенно в специальных динамических режимах, происходит изменение состава рабочего созвездия и, соответственно, недостаточно точное представление способа (в виде корреляционной матрицы погрешности) при комплексировании информации ССН и ИНС, что приводит к уменьшению точности и достоверности навигационных определений.

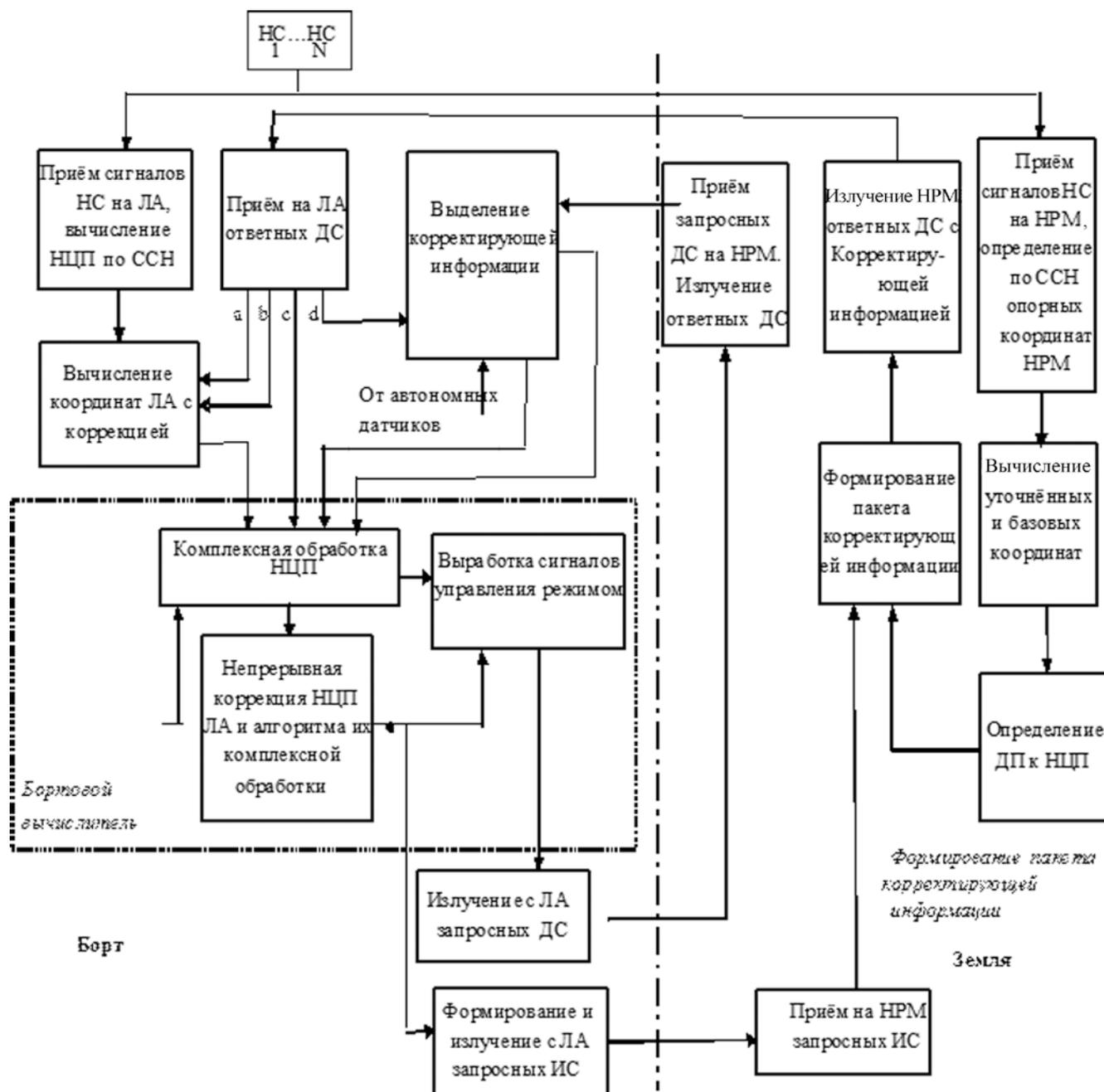


Рис. 2. Блок-схема комплексного спутниково-дальномерного способа навигации

На рис. 3 представлена типовая блок-схема операций комплексного способа навигации на основе ИСН и ССН. Суть данного комплексного способа в совместной обработке данных о положении ЛА, полученных каждым из способов, и вычислении погрешности инерциального способа на основе существенно более точного спутникового способа.

Выходные данные о положении ЛА определяются путем суммирования показаний инерциального способа с вычисленной погрешностью этого способа.

В работе «ВНИИРА-Навигатор» предложена дополнительная корректировка навигационных параметров ЛА, учитывающая влияние изменения ориентации ЛА благодаря учету текущего изменения состава рабочего созвездия [23].

Корректировка данных при изменении ориентации ЛА основана на учете изменения ориентации антенны бортового приемника сигналов НС, определяющего «видимость» различных НС («весовой коэффициент» данного НС при обработке показаний по ССН).

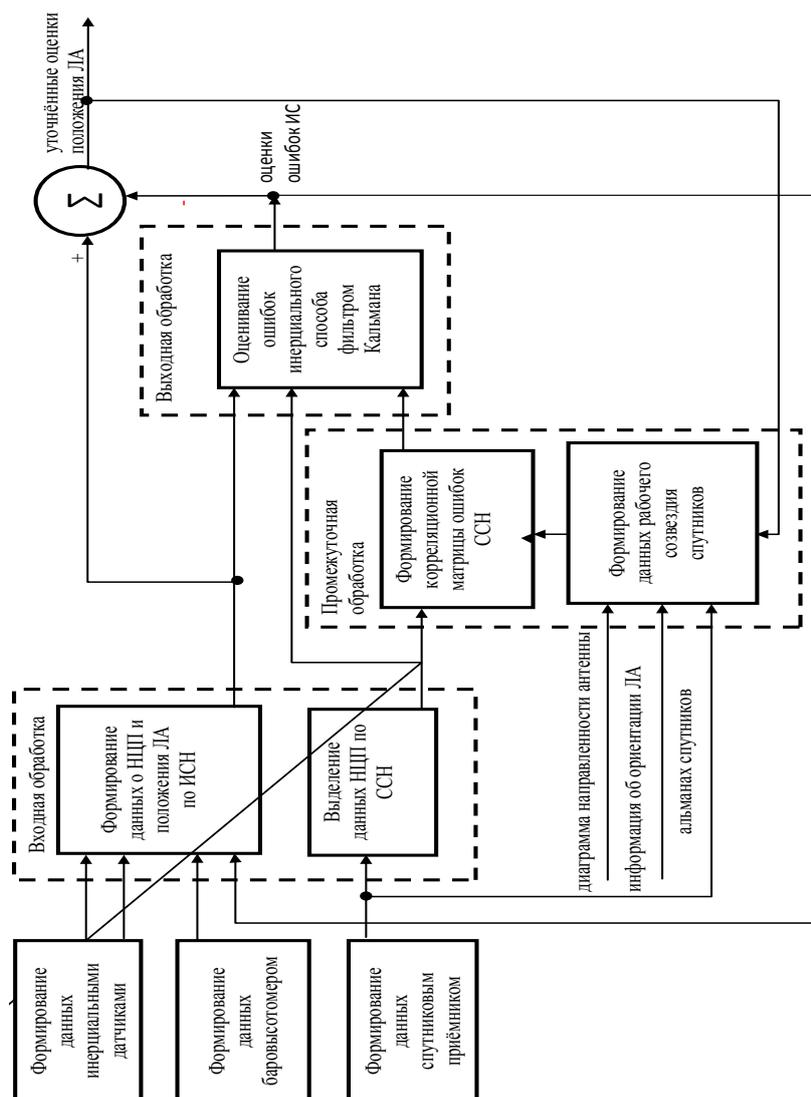


Рис. 3. Блок-схема инерциально-спутникового способа навигации

Рассмотрим основные используемые методы при комплексной обработке навигационных параметров, определенных различными способами навигации.

Объединение навигационной информации, получаемой путем решения навигационной задачи независимо по ССН и ДСН и определение оптимальной оценки X выполняется с помощью соотношения [1]

$$X = (1 - K) X_{сп} + K X_{дм}, \quad (3)$$

где $X_{сп}$ – оценка координат при вычислении по ССН; $X_{дм}$ – оценка координат при вычислении по ДСН; K – оптимальный коэффициент усиления, вычисляемый при непрерывной коррекции по формуле

$$K = P_{сп} (P_{сп} + P_{дм})^{-1}, \quad (4)$$

где $P_{сп} = P_{дп} + P_{ла}$, $P_{сп}$ – корреляционная матрица ошибок определения координат по ССН; $P_{дм}$ – элементы корреляционной матрицы ошибок определения поправок навигационных параметров по ДСН; $P_{дп}$ – элементы корреляционной матрицы ошибок определения поправок при навигации ЛА с использованием на маршруте сигналов ряда НРМ; $P_{ла}$ – элементы корреляци-

онной матрицы ошибок определения координат на борту ЛА, создаваемых шумом, многолучевостью распространения радиосигнала и другими помехами.

Результирующая корреляционная матрица ошибок определения координат ЛА с помощью комплексного алгоритма равна

$$P = P_{\text{дм}} \cdot P_{\text{сп}} / (P_{\text{сп}} + P_{\text{дм}}). \quad (5)$$

Вычислительный аппарат комплексной обработки основывается на методах линейного программирования, как правило, на методологии фильтров Калмана [7], в том числе расширенных фильтров Калмана, применяемых для уравнений состояния вида

$$x(k + 1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k) + w(k), \quad (6)$$

где $x(k)$ – вектор состояния в момент времени k , A – переходная матрица системы, B – матрица управления, $u(k)$ – вектор управления в момент времени k , $w(k)$ – вектор возмущений в момент времени k .

Коэффициенты фильтра для оптимального оценивания вектора состояния (6), вычисляются по известной формуле [20]

$$K = P(k + 1) \cdot (H \cdot P(k + 1) \cdot H^T + R), \quad (7)$$

где $P(k + 1)$ – апостериорная ковариационная матрица, H – матрица измерений, R – вектор измерительных шумов.

Непрерывная коррекция производится путем соответствующего изменения весовых коэффициентов, используемых в фильтре Калмана (7) на основе непрерывной оценки погрешности для ССН и ДСН, изменения элементов соответствующих корреляционных матриц [18].

На рис. 4 представлено распределение патентов по способам и системам навигации в различных вариантах комплексирования за период 2000–2013 гг.

Из рис. 4 видно, что интерес к комплексам INS + GPS и DME + GPS неуклонно возрастает. Интерес к комплексам INS + DME и INS + DME + GPS практически не развивается.

На рис. 5 упомянутые распределения представлены по странам. Из рис. 5 видно, что США является безусловным лидером.

На рис. 6 представлены распределения количества патентов, полученных разными фирмами для комплексных способов навигации по GPS + INS, а на рис. 7 – для комплексных способов GPS + DME.

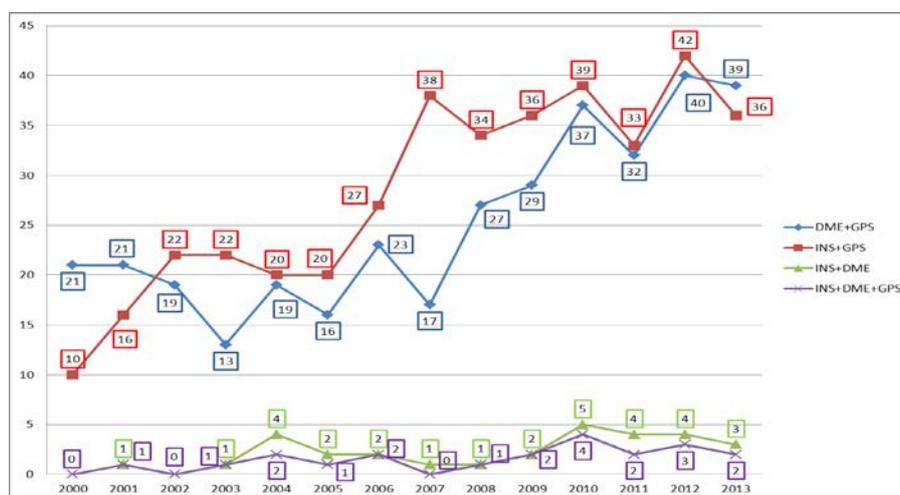


Рис. 4. Распределение количества полученных патентов по комплексным системам навигации в период 2000–2013 гг.

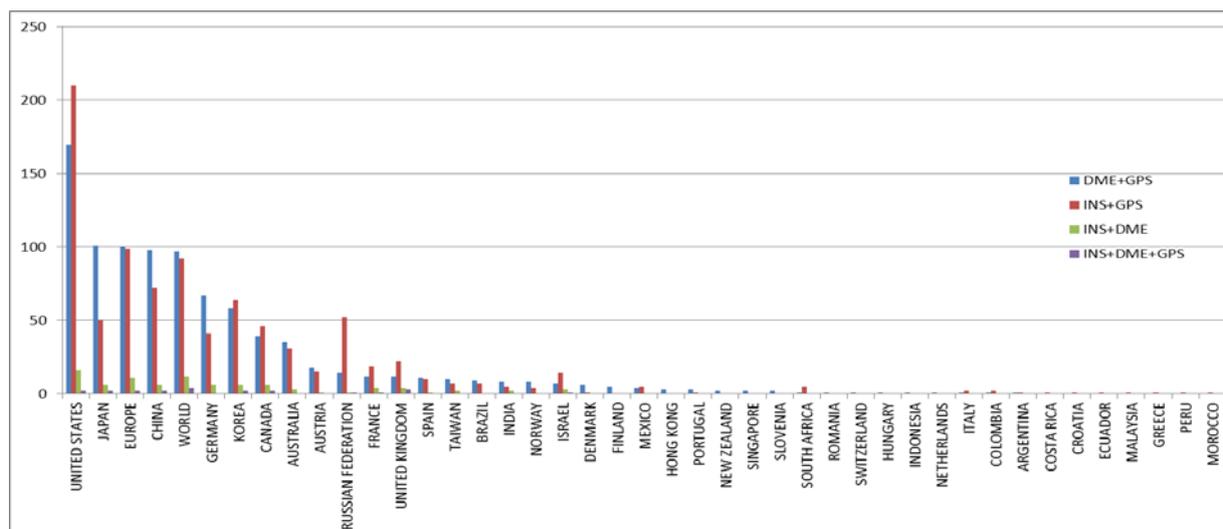


Рис. 5. Распределение количества патентов по комплексным системам навигации по странам за период 2000–2013 гг.

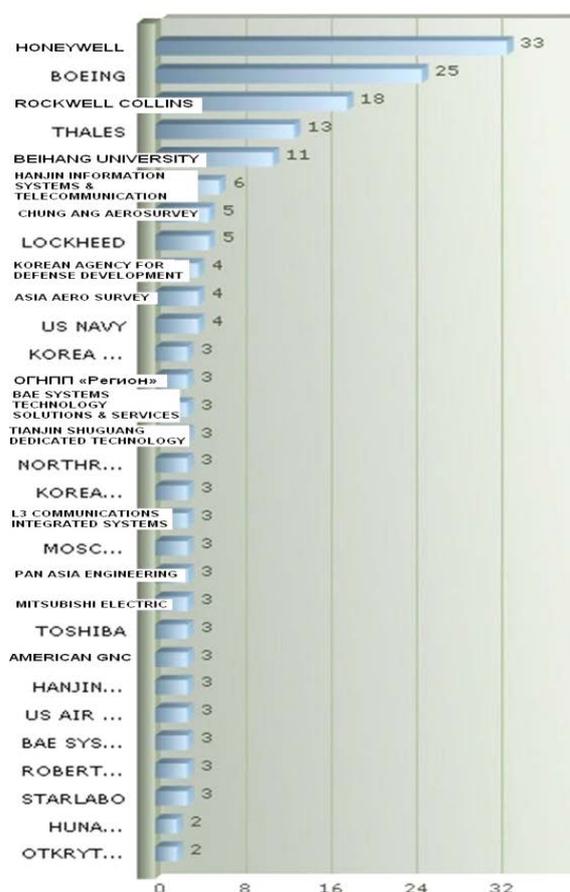


Рис. 6. Распределение количества патентов по комплексным системам навигации GPS + INS по фирмам за период 2000–2013 гг.

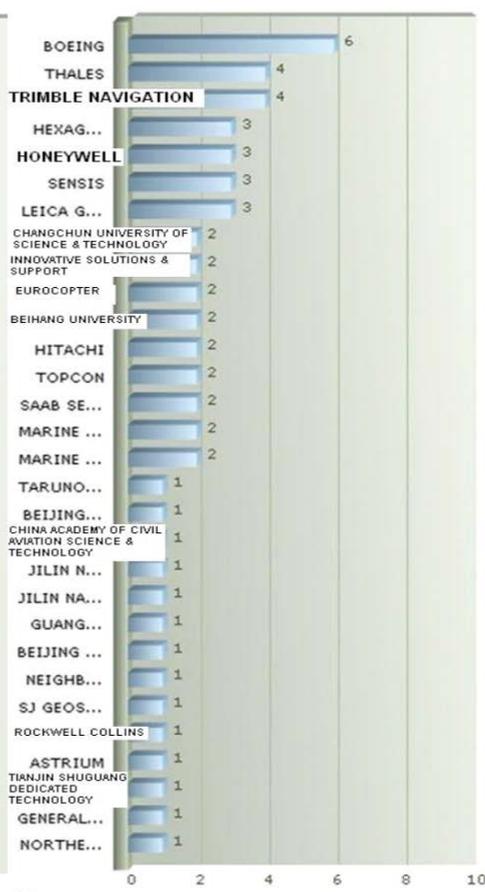


Рис. 7. Распределение количества патентов по комплексным системам навигации GPS + DME по фирмам за период 2000–2013 гг.

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа представленных материалов за 2000–2013 гг. установлено, что наиболее распространенными в мире являются способы комплексирования инерциальных и

спутниковых систем, а также комплексирование дальномерных и спутниковых систем. Выявлена тенденция значительного роста количества патентов на эти способы комплексирования.

2. Способы комплексирования инерциальных и дальномерных систем, или способы совместного использования инерциальных, дальномерных и спутниковых систем патентовались мало. В рассматриваемый период выявлена тенденция слабого роста количества патентов на эти способы комплексирования.

3. Большая часть патентов на комплексные способы навигации принадлежит фирмам Honeywell, Boeing, Rockwell Collins и Thales.

4. Россия входит в первую пятерку стран по количеству патентов, защищающих способы комплексирования инерциальных и спутниковых систем навигации.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Приносим благодарность сотруднице Российской Национальной библиотеки М.И. Кравец за работу с поисковой системой «Орбит».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Roger R.M.** Applied mathematics in integrated navigation systems. AIAA, 2007.
2. **Titterton D.H., Weston J.L.** Strapdown Inertial Navigation Technology. Second Edition, MIT, 2007.
3. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.; под ред. В.С. Шебшаевича. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
4. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2012. 800 с.
5. **Сосновский А.А.** и др. Авиационная радионавигация, справочник. М.: Транспорт, 1990.
6. **Гавришук В.В.** и др. Моделирование и исследование комплексной навигационной системы, содержащей DME, DVC и датчик курса // Вопросы радиоэлектроники. 2009. Т. 2, № 2. С. 156–165.
7. Радиотехнические системы: учебник для студ. высш. учеб. заведений / под ред. Ю.М. Казаринова. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 592 с.
8. Patent US 6901331, 31.05.2005 г.
9. Patent US 6606559, 12.08.2003 г.
10. Patent US 6163753, 19.12.2000 г.
11. Patent US 5997995, 28.09.1999 г.
12. Patent US 5801659, 01.09.1998 г.
13. Patent US 2000119638, 24.06.2004 г.
14. Patent US 4918610, 17.04.1990 г.
15. Patent US 6529820, 04.03.2003 г.
16. Патент РФ 2478979, 11.11. 2011 г.
17. Патент РФ 2510518, 17.08.2012 г.
18. Патент РФ 2190719, 29.06.2001 г.
19. Патент US 641780281, 07.09.2002 г.
20. Патент US 2010106416, 29.04.2010 г.
21. Патент US 7711482, 04.05.2010 г.
22. Патент EP 2026037 A2, 15.02. 2009 г.
23. Заявка РФ 201313555 от 20.07.13 г.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабуров Владимир Иванович, доктор технических наук, директор НТЦ «Навигатор» ОАО «ВНИИРА», электронный адрес: aspirantura@vniira.ru.

Гальперин Теодор Борисович, кандидат технических наук, заслуженный изобретатель России, главный специалист ЗАО «ВНИИРА-Навигатор», электронный адрес: aspirantura@vniira.ru.

Рогова Анна Александровна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НТЦ «Навигатор» ОАО «ВНИИРА», электронный адрес: aspirantura@vniira.ru.

Саута Олег Иванович, доктор технических наук, начальник научно-исследовательского сектора 0124022 НТЦ «Навигатор» ОАО «ВНИИРА», электронный адрес: aspirantura@vniira.ru.

NAVIGATION AND LANDING AVIONICS INTEGRATED SYSTEM PROGRESS TREND

Vladimir I. Baburov

«All-Russian Research Institution of Radio Equipment» joint-stock company,
St. Petersburg, Russia, aspirantura@vniira.ru

Teodor B. Galperin

«All-Russian Research Institution of Radio Equipment» joint-stock company,
St. Petersburg, Russia, aspirantura@vniira.ru

Anna A. Rogova

«All-Russian Research Institution of Radio Equipment» joint-stock company,
St. Petersburg, Russia, aspirantura@vniira.ru

Oleg I. Sauta

«All-Russian Research Institution of Radio Equipment» joint-stock company,
St. Petersburg, Russia, aspirantura@vniira.ru

ABSTRACT

Advantages and disadvantages of various navigation methods are considered. The main advantage of an inertial method of navigation consisting in a high noise stability is given. The drawback of this navigation method consisting in accumulating mistakes by the time is given. The benefit of satellite navigation systems from the point of view of their globality and high precision of measurement is proved. Disadvantages and advantages of a rho-rho navigation in comparison with satellite navigation systems are considered. The main activities of a complex using of satellite and radar navigation aids, and also satellite and inertial navigation aids are given. Various systems of complex use of a rho-rho navigation and satellite navigation systems are considered. The common important faults inherent in methods and systems according to patents are in detail considered. Methods of a complex using of inertial and satellite navigation systems in the form of inertial system use are given in a complex with the satellite receiver in contours of phase and frequency autocontrol of a satellite signal to increase accuracy and continuity of a signal from the receiver, and also in the form of a satellite method use with the differential mode to increase accuracy of an inertial method with correcting the inertial system signal are given. The analysis of various patents for complex methods of navigation is carried out.

Key words: Global Navigational Satellite System (GNSS), Inertial Navigation System (INS), Distance-Measuring Equipment (DME).

REFERENCES

1. **Roger R.M.** Applied mathematics in integrated navigation systems. AIAA, 2007.
2. **Titterton D.H., Weston J.L.** Strapdown Inertial Navigation Technology. Second Edition, MIT, 2007.
3. **Shebshayevich B.C., Dmitriyev P.P., Ivantsevich N.V., etc.** Network satellite radio navigational systems. Under the editorship of V.S. Shebshayevich. 2nd prod. M.: Radio i svyaz [Radio and communication], 1993, 408 p. (in Russian)

4. GLONASS. The principles of creation and functioning. Under the editorship of A.I. Perov, V.N. Harisov. 4 prod. M.: Radiotekhnika [Radio engineering], 2012, 800 p. (in Russian)

5. **Sosnovsky A.A.**, etc. Aviation radio navigation, reference book. M.: Transport, 1990. (in Russian)

6. **Gavrishchuk V.V.**, etc. Modeling and research of the complex navigation system containing DME, DVS and the sensor of a rate. Voprosy radioelektroniki [Radio electronics questions, it is gray]. 2009, вып. 2, № 2, s. 156–165.

7. Radio engineering systems: the textbook for student high studies institutions. Under the editorship of Yu.M. Kazarinov. M.: Izdatelskij centr "Akademiya" [M.: Publishing center "Akademiya"], 2008, 592 p. (in Russian)

8. Patent US 6901331, 5/31/2005.

9. Patent US 6606559, 8/12/2003.

10. Patent US 6163753, 12/19/2000.

11. Patent US 5997995, 9/28/1999.

12. Patent US 5801659, 9/1/1998.

13. Patent US 2000119638, 6/24/2004.

14. Patent US 4918610, 4/17/1990.

15. Patent US 6529820, 3/4/2003.

16. Russian Federation patent 2478979, 11.11. 2011.

17. Russian Federation patent 2510518, 8/17/2012.

18. Russian Federation patent 2190719, 6/29/2001.

19. US 641780281, 07.0 patent of 9.2002 g.

20. US 2010106416 patent, 4/29/2010.

21. US 7711482 patent, 5/4/2010.

22. EP 2026037 A2 patent, 15.02. 2009.

23. The request Russian Federation 201313555 of 2.