

Раздел II. Навигация и наведение

УДК 621.317.4.

Г.И. Джанджгава, Г.И. Герасимов, Л.И. Августов

НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПОЛЯМ

Статья посвящена решению актуальной задачи по созданию систем навигации и наведения, удовлетворяющих совокупности требований к системам навигации боевых ЛА по автономной точности, глобальности, скрытности и помехозащищенности.

Во введении приведено краткое описание навигационных свойств пространственных геофизических полей (гравитационное, магнитное, электромагнитное) и классификация систем навигации и наведения по указанным полям.

В основном содержании статьи изложено достигнутое состояние в разработке каждой разновидности систем навигации и наведения по пространственным полям по результатам выполненных ранее научно-исследовательских работ в части их картографического обеспечения и бортовых измерителей параметров полей. Обращено внимание на влияние магнитовариационных помех на работу системы навигации по магнитному полю Земли, приведены экспериментальные данные об информативности аномальной составляющей гравитационного поля в зависимости от высоты и результаты экспериментальных исследований информационных свойств радиоизлучений самолетов Су-24 и Су-27 вследствие их электризации.

На основании проведенного анализа результатов НИР сформулированы выводы, которые могут быть приняты за основу для принятия организационно-технических решений.

Векторный магнитометр; гравиградиентометр; датчик-анализатор спектра радиоизлучений; дисперсия и интервал корреляции аномалий.

G.I. Dhzandzhgava, G.I. Gerasimov, L.I. Avgustov

NAVIGATION AND HOMING BY SPATIAL GEOPHYSICAL FIELDS

Article is devoted to solution an actual task on creation navigation and guidance systems, complied with set of standard requirements to navigation systems of combat airplanes concerning global effect, autonomous accuracy, security and interference protection.

Introduction gives a short description of navigation properties of spatial geophysical fields (gravitational, magnetic, electromagnetic) and classification of navigation and guidance systems according to specified fields.

In main part of article are stated obtained results of developing each kind of navigation and guidance systems according to spatial fields. Results are based on implemented research activity regarding cartographical maintenance and airborne measurement equipment of fields' parameters. Consideration is also given to matter of affecting by magnetic disturbances an operation of navigation system according to magnetic field of the Earth, stated experimental data concerning anomalous component of gravitational field, depending on height and results of experimental studies according to properties of airplanes (Su-24 and Su-27) radio emissions due to electrization.

On the basis of conducted analysis of R&D results are formulated conclusions, which may be assumed as a basis for acceptance logistic solutions.

Vector magnetometer; gradiometer; sensor-analyzer of radio emission spectrum; dispersion and an interval of correlation anomalies.

Введение. Задача создания автономных систем навигации и наведения, удовлетворяющих совокупности требований в части глобальности, автономной точности, скрытности и помехозащищенности решается на пути создания корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения (КЭСНН) с комплексным использованием информации о поверхностных и пространственных геополях. Пока что практическое применение нашли КЭСНН по поверхностным полям – рельеф земной поверхности (РЗП), радиолокационный (РЛК) и оптический контраст (ОК).

В отличие от поверхностных полей пространственные являются глобальными, трехмерными, зависящими от высоты и измерять параметры этих полей можно только в точке, где находится датчик. Информативной для навигации является аномальная составляющая, определяемая в основном неоднородностью земной коры по плотности (ГПЗ) и по проводимости (МПЗ), что в сущности и определяет стабильность и помехозащищенность этих полей. С ростом высоты меняется характер полей – исчезают высокочастотные компоненты, уменьшается полезный сигнал, начинают преобладать низкие частоты.

К пространственным относятся также электромагнитные поля (ЭМПЗ) искусственного происхождения, связанные с работой теле- радиовещательных станций, приводных станций на аэродромах и других источников радиоизлучений, координаты которых известны и которые формируют электромагнитный «ландшафт» местности.

Электромагнитные поля возбуждаются также подвижными объектами в атмосфере в связи с их электризацией. Исследование этого явления привело к открытию принципов пассивной макроволновой радиолокации, впервые сформулированных академиком РАН Красовским А.А. На основе этих принципов можно создавать новые системы относительной навигации, решать задачи распознавания и наведения подвижных в атмосфере объектов.

Измеряемыми параметрами пространственных полей являются:

- ◆ для МПЗ – модуль вектора магнитной индукции и составляющие вектора (северная, восточная и вертикальная);
- ◆ ГПЗ – 1-е производные гравипотенциала (3 компоненты ускорения силы тяжести) и 2-е производные гравипотенциала (9 компонент градиента силы тяжести);
- ◆ ЭМПЗ – спектральные «портреты» ЛА, связанные с их электризацией, спектральные «портреты» наземных источников радиоизлучений с известными координатами.

Глобальность и непрерывность пространственных полей позволяют обеспечить практически непрерывную коррекцию ИНС. Это дает возможность использовать сравнительно грубые ИНС на уровне 0,1–0,05 град/ч.

Системы навигации и наведения по пространственным полям можно разделить:

- ◆ на МагКЭНС-1, навигация по модулю вектора магнитной индукции;
- ◆ МагКЭНС-2, навигация и наведение по вектору магнитной индукции;
- ◆ ГравиКЭНС-1, навигация по аномалиям силы тяжести;
- ◆ ГравиКЭНС-2, навигация и наведение по градиентам силы тяжести;
- ◆ КЭНС–ЭМП, навигация и наведение по электромагнитным портретам.

Магнитометрические КЭСН

МагКЭНС-1. Из состава навигационного комплекса в режиме МагКЭНС используются ИНС, магнитометр, баровысотометр, и БЦВМ, с бортовой базой картографических данных.

В 80-х гг. прошлого века в РПКБ был разработан экспериментальный образец такой системы. Проведены летные испытания, подтвердившие её принципиальную работоспособность.

В ВВИА им. Н.Е. Жуковского была проведена съемка АМПЗ на аэродроме на взлетных и рулежных дорожках с дискретом 2 м. По результатам съемки была показана возможность аэродромной навигации, взлета и посадки по данным об АМПЗ. Там же были разработаны методы навигации по пространственным ГФП при неполном их описании. Это метод Фурье-навигации и навигация по линейным ориентирам. Над разломами земной коры МПЗ и ГПЗ изменяются скачкообразно и карту разломов земной коры можно использовать как карту линейных ориентиров (рис. 1). Эти скачки проявляются на высотах в сотни километров и влияют на траекторию движения спутников.

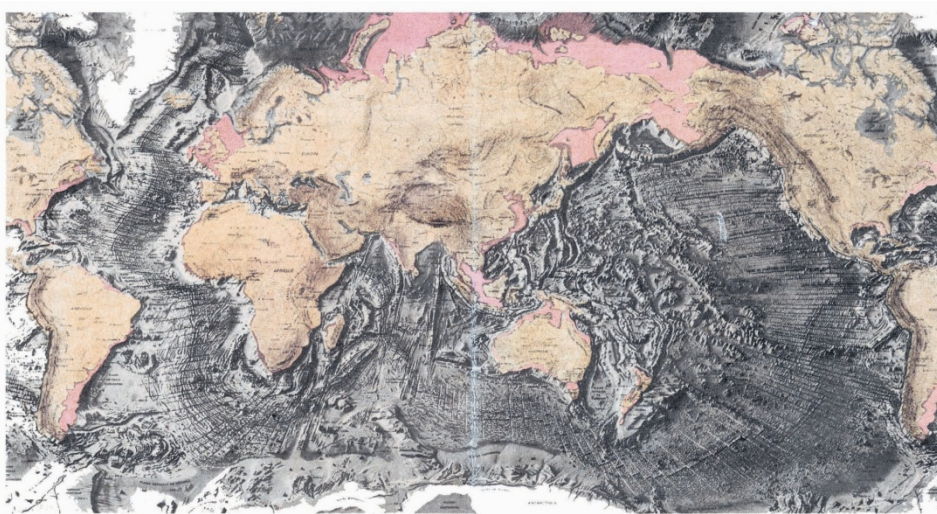


Рис. 1. Сухой профиль планеты

МагКЭНС-2. Создание её стало возможным в связи с созданием методики преобразования модульных карт МПЗ в векторные, разработанной в СПб филиале ИЗМИРАН. Основное её преимущество – более высокая точность навигации, чем у МагКЭНС-1 и возможность самонаведения на магнитоконтрастные объекты. Векторный датчик находится в стадии разработки. В составе датчика – квантовый магнитометр, 3-компонентный феррозондовый магнитометр и микромеханическая БИНС, корректируемая от основной ИНС. Блок измерений формирует 3-и компоненты вектора (северная, восточная и вертикальная).

Влияние магнитных бурь и возмущений (вариаций) МПЗ. Часто встречается вопрос – какое влияние на работу МагКЭНС оказывают магнитные бури и разного рода вариации. Для выяснения этого вопроса в СПбФ ИЗМИРАН было проведено исследование многолетних показаний магнитовариационных станций, расположенных на разных широтах. В ходе исследований было показано [3]:

1. Во время магнитных бурь в высоких широтах (>65 град) геомагнитные возмущения могут достигать ~1000 нанотесл (нТл) с периодом 150–600 с в течение нескольких часов. Характерное изменение трех компонент магнитного поля во время бури представлено на рис. 2. В средних широтах возмущения в несколько раз меньше и обычно не превышают 100 нТл. Скорость распространения составляет от единиц до десятков километров в секунду.

- Утренние и ночные пульсации изменяются в диапазоне ± 20 нТл с периодом 150–600 с, дневные пульсации с периодом 45–150 с и амплитудой 20–100 нТл.

По результатам исследований возмущений геомагнитного можно сделать следующие выводы:

- В высоких широтах вариации МПЗ во время магнитных бурь достигают 120–150 нТл с периодом 150–600 с. В средних широтах амплитуда вариаций падает в 3-4 раза.
- Суточные геомагнитные вариации составляют 6–30 нТл (σ) по амплитуде и периодом 100–150 с.

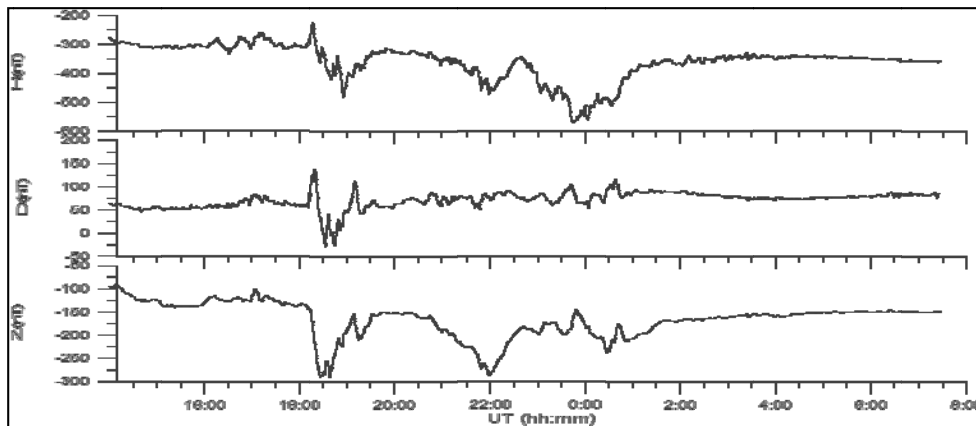


Рис. 2. Пример магнитной бури на станции Килтисярви, Финляндия 22-23.02 2003 г.

При оценке влияния возмущений МПЗ на работоспособность КЭНС следует иметь в виду, что аномальная составляющая МПЗ выделяется путем формирования приращений на интервале не превышающем интервала корреляции поля. В зависимости от высоты полета и морфологии местности интервал корреляции меняется в пределах 10–25 км. При скорости полета 10–12 км в минуту проход интервала корреляции по времени займет около 2 минут. За это время максимальное изменение МПЗ во время магнитной бури составит не более 15–20 нТл. Это на уровне погрешности картографирования МПЗ и погрешности компенсации девиации.

Минимальная величина отношения сигнал/шум, при котором достигается точность позиционирования на уровне дискрета карты, равна 1,5–2,0, при правильном выборе параметров экстремального координатора. Соответственно в высоких широтах МагКЭНС будет работоспособна на участках поля с аномалиями от 50 нТл (σ), на средних с аномалиями от 30 нТл (σ) при достигнутой точности картографирования. В области экватора работоспособность КЭНС будет определяться в основном ошибками картографирования и измерений магнитометра.

Эталонное картообеспечение МагКЭНС. К концу прошлого века Мировой океан был охвачен модульной съемкой в среднем на 45 %, в том числе северное полушарие на 75 %, южное на 22 %. Погрешность съемки – 3–40 нТл, точность плановой привязки измерений – 200–500 м.

В СПБФ ИЗМИРАН обобщены материалы выполненных съёмок в виде схем заснятости с учетом погрешности и масштабов съёмок. Степень пригодности материалов сводится к решению задачи построения цифровых магнитных карт по разновременным, разнородным по масштабам и разновысотным съемкам на основе анализа спектральной структуры аномального магнитного поля исследуемого региона.

Анализ погрешностей съемок в регионах позволил разделить данные съемок и соответственно цифровых моделей геомагнитного поля на три группы, имеющие погрешности в пределах от 3 до 25 нТл, от 25 до 40 нТл и более 40 нТл, составляющих соответственно 31 %, 28 % и 31 % от общего числа съемок. Среднее значение дисперсии аномалий МПЗ по земному шару составляет 184 нТл.

Эти данные легли в основу создания базы геомагнитных данных в СПбФ ИЗМИРАН. База разработана на основе современных аппаратных и программных средств и представляет автоматизированную систему сбора, хранения, обновления и обработки магнитометрических данных.

Принципиальным новшеством в данной базе является возможность формирования векторных карт по модульным съемкам [4]. В отличие от модульных карт, где каждая точка пространства характеризуется одним параметром – модулем вектора магнитной индукции, в векторных картах каждая точка пространства характеризуется главной, региональной и аномальной составляющими. Главная и региональная составляющие описываются аналитически: главная – рядом Гаусса, региональная – набором фиктивных диполей. Аномальная составляющая представлена в виде четырех параметров – северной (X_a), восточной (Y_a), вертикальной (Z_a) компонент и модуля аномальной части поля. Погрешность векторного представления не превышает погрешности исходного картографического материала. Указанные компоненты являются статистически независимыми и позволяют повысить точность навигации.

В настоящее время в СПбФ ИЗМИРАН каталог Генеральной магнитной съемки переведен в цифровой вид и будет использоваться при вычислении карт компонент геомагнитного поля (H -, Z - и D -составляющих) для обеспечения нужд наземной, морской и воздушной навигации.

Работоспособность созданной БЦМД была проверена на двух типовых участках на акватории Атлантического океана размером 250 x 500 км и дискретностью около 500 м. Интенсивность аномалий колеблется от – 800 до +1200 нТл на уровне моря, интервал корреляции поля –15–30 км.

На участках проведено имитационное моделирование МагКЭНС по каждой компоненте в отдельности и по их совокупности. Погрешность бортовых измерений и картографирования с учетом вариаций МПЗ принималась на уровне 50–100 нТл (2 σ). При начальных позиционных ошибках ± 15 км и интервалах наблюдения 25–30 км достигалась точность оценки местоположения в пределах одного дискрета поля (500 м).

Для реализации МагКЭНС необходимо создать службу в ВТУ ГШ, которая бы решала вопросы обеспечения комплексов бортового оборудования магнитометрическими данными.

Гравиметрические КЭСН. Из состава навигационного комплекса в режиме ГравиКЭНС используются ИНС, гравиметр, гравивариометр, баровысотометр, БЦВМ и бортовая база с гравиданными.

ГравиКЭНС-1. Наиболее близкими к практической реализации следует отнести системы, работающие по аномалиям ускорений силы тяжести (УСТ). При этом используются банки исходных данных в виде карт аномалий силы тяжести в редукции Фая масштаба 1: 200 000 и крупнее, а также бортовые гравиметры, которые в авиационном применении могут обеспечить точность измерений $\sim 1,0$ мГал при условии компенсации помех вертикальных ускорений и кориолисовых ускорений объекта.

В МИЭиА была разработана одна из первых ГравиКЭНС и проведен летный эксперимент в 90-х гг. По данным эксперимента точность оценивания местоположения составила 600...800 м по координатам, 0,3...0,5 м/с по скорости [1]. Грави-

КЭНС по полю ускорений силы тяжести могут обеспечить в перспективе точность оценки плановых координат – на уровне 100 – 1000 м (СКО) в зависимости от высоты полета в пределах 15 км. Основная трудность – разделение ускорений объекта в вертикальной плоскости и ускорений силы тяжести. Практическое применение такие системы находят на подводных кораблях

ГравиКЭНС-2. Другие возможности появляются при использовании гравивариометра или гравиградиентометра. Эти приборы принципиально нечувствительны к линейным ускорениям. Существенное значение имеет относительно слабая зависимость вторых производных гравипотенциала от высоты. Например, вертикальный градиент изменяется на 0,8–1,0 ЭТВеш при изменении высоты на 1 км. В этом случае для контроля текущей высоты полета на авиационном эшелоне будет достаточно баровысотометра. Проблема заключается в разработке бортового гравиградиентометра (БГГ). Исследования по созданию БГГ велись в России в 80–90 гг. прошлого века [1]. Были созданы лишь макетные образцы. В ОАО «РПКБ» разработаны экспериментальные образцы чувствительных элементов БГГ на гантелях и акселерометрах, точность измерений которых пока не достигла требуемой [4]. В США в 1996 г. был создан для стратегической подводной лодки БГГ на акселерометрах, расположенных на вращающейся платформе. С помощью специальной программы по данным БГГ формировалось 3-мерное изображение подводной обстановки вокруг лодки. При наличии карты рельефа морского дна выполнялась коррекция показаний бортовой ИНС. С помощью БГГ можно обеспечить самонаведение боевых блоков на центр масс цели.

Эталонное картообеспечение ГравиКЭНС. Основными средствами получения информации о ГПЗ в Мировом океане являются морская гравиметрическая съемка и спутниковая альтиметрия. Одним из основных результатов выполненных в рамках НИР «Геофизика-Р2010» исследований является создание экспериментальной базы данных о ГПЗ для картографического обеспечения перспективных КЭНС. Созданная БД содержит необходимый объем исходной информации для создания цифровых карт параметров ГПЗ (УСТ, составляющих УОЛ) повышенной точности и детальности на согласованные районы акватории Мирового океана [2, 4].

В результате выполненных теоретических исследований также разработана методика и технология создания таких карт с использованием созданной базы данных. Эта разработка доведена до практической реализации в виде комплекса вычислительных программ, с использованием которого созданы цифровые карты ГПЗ на районы озера Байкал, Камчатки, акватории Атлантического океана.

На основании полученных результатов сделаны следующие основные выводы:

- ◆ имеющиеся данные спутниковой альтиметрии и гравиметрической съемки, организованные в форме компьютерной базы данных, обеспечивают возможность формирования цифровых карт (моделей) параметров ГПЗ на континентальные районы и акваторию Мирового океана. На текущий момент около 80 % площади акватории Мирового океана покрыто сетью спутниковых радиовысотометрических измерений, позволяющей определять высоты квазигеоида (ВКГ), аномалии силы тяжести (АСТ) и составляющие отклонения отвесной линии (УОЛ) со среднеквадратической погрешностью (СКП) 0,1–0,3 м, 5–7 МГал и 0,5–2'' соответственно. Такая точность картографирования позволяет обеспечить точность автономной навигации над морем по ГПЗ на уровне 100÷200 м;
- ◆ разработанные методики и технологии трансформации характеристик ГПЗ обеспечивают возможность получения требуемой точности определения значений аномального УСТ и составляющих УОЛ в узловых точках создаваемых цифровых карт.

Статистические характеристики АГПЗ. Исследования по оценке информативности характеристик АГПЗ, выполненные в [2], позволили обосновать выбор параметров информативности, разработать методы их расчета и выполнить их экспериментальную проверку с использованием созданного комплекса вычислительных программ. При этом основное внимание уделено исследованию информативности вторых производных гравитационного потенциала для характерных форм рельефа, включая границы "вода – суша" (береговая линия морей, океанов, реки, озера), известные геологические разломы земной коры. В качестве параметров информативности использовались дисперсия и радиус корреляции характеристик АГПЗ.

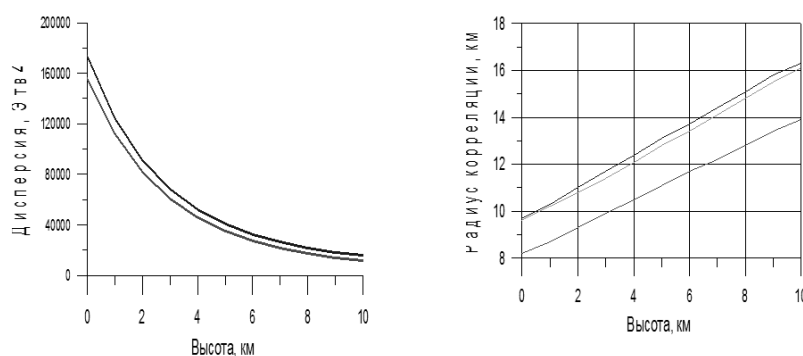


Рис. 3. Зависимость дисперсии и интервала корреляции второй производной от высоты в районах Камчатки и озера Байкал

Электризация ЛА в полете и радиоизлучение. На протяжении всей истории развития авиации осуществлялась борьба с электризацией ЛА в полете как источника помех радиосвязи и других нежелательных явлений. Несмотря на это удалось лишь ограничить статическую электризацию и помехи в каналах радио. Стремясь ограничить помехи для связанных приемных радиостанций, находящихся рядом с разрядниками и другими коронирующими точками ЛА, разработчики не пытались изучить шумовое радиоизлучение в ближней и дальней зоне ЛА.

Между тем спектр этого излучения резко отличается от спектра токов коронных разрядов и имеет характерный для каждого вида ЛА ряд максимумов. Разрядник или любая другая коронирующая точка является лишь шумовым возбудителем весьма сложной резонансной "антенной системы", которой служит сам металлический ЛА или металлический силовой каркас ЛА. Эта "антенная система" имеет множество собственных электромагнитных "тонов", которые и определяют спектр радиоизлучения или спектральный «портрет» ЛА.

Для грубой оценки параметров излучения можно использовать наиболее простую "стержневую" электродинамическую модель тяжелого самолета. В такой модели крыло, фюзеляж, стабилизатор, киль заменяются стержнями соответствующей длины. Для плоскости Oxz связанной системы координат стержневая электродинамическая модель может иметь вид как на рис. 3. Такая модель позволяет приближенно определять низкие частоты собственных тонов. Для определения ширины резонансных пиков требуются более точное численное электродинамическое моделирование или натурные эксперименты.

Помимо электродинамических тонов существует еще одна несущая частота электризационного радиоизлучения, связанная не с размерами ЛА, а с высотой его полета. Это излучение диполя – ЛА и его электрическое отражение земной или морской поверхностью за счет флуктуации электростатического потенциала, возбуждаемого коронными разрядами, называемое зеркальным.

Принципы пассивной макроволновой радиолокации и возможные её применения (рис. 4) впервые сформулированы известным ученым, академиком РАН А.А. Красовским в ряде работ [6], [5]. Фактически А.А. Красовский заложил основы нового технического направления, имеющего широкий спектр практических применений и, прежде всего, в авиации.

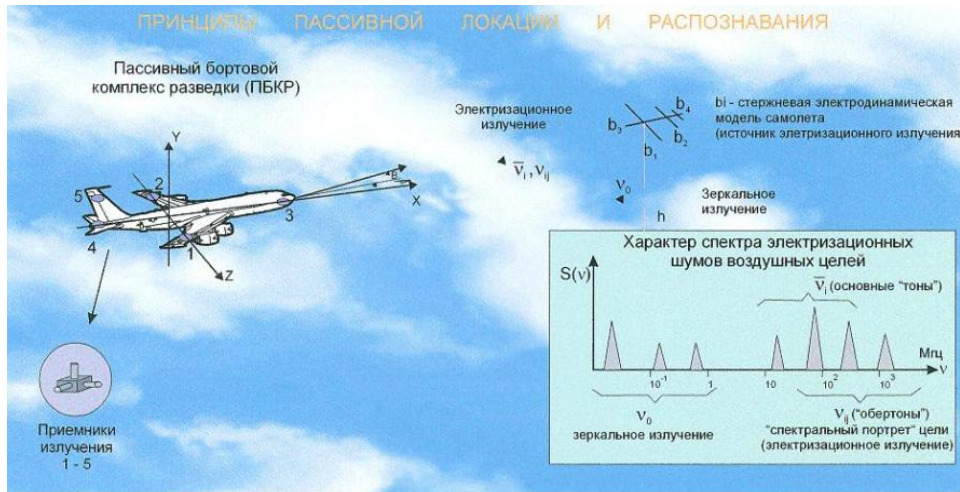
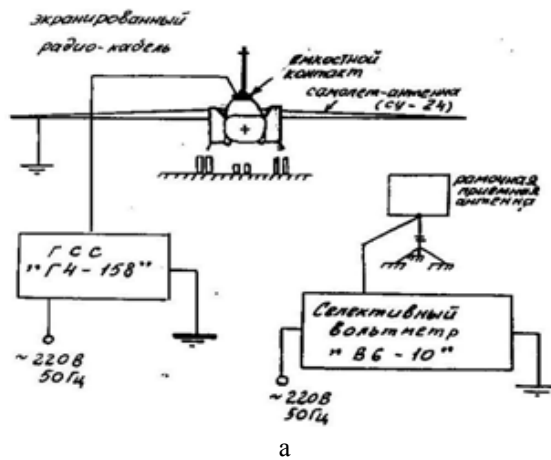


Рис. 4. Принципы пассивной макроволновой радиолокации и возможные её применения

Для выяснения информационных свойств электризационных излучений проведены ряд ангарных и полевых исследований на реальных объектах. Ангарные исследования проводились на самолетах Су-24 и Су-27, полевые исследования проводились на аэродромах на стоянке и при заходе самолетов на посадку. Схема одного из экспериментов на самолете Су-24 представлена на рис. 5,а. Корпус самолета заряжался через емкостной контакт одновольтными импульсами от генератора стандартных сигналов. Возникающее радиоизлучение фиксировалось с помощью рамочной антенны и селективного вольтметра в определенных точках круга радиусом 10 м. На рис. 5,б изображена схема распределения энергии 1-го тона излучений фюзеляжа и крыла самолета. На рис. 5,в представлено распределение энергии излучений нечетных тонов крыла и фюзеляжа.



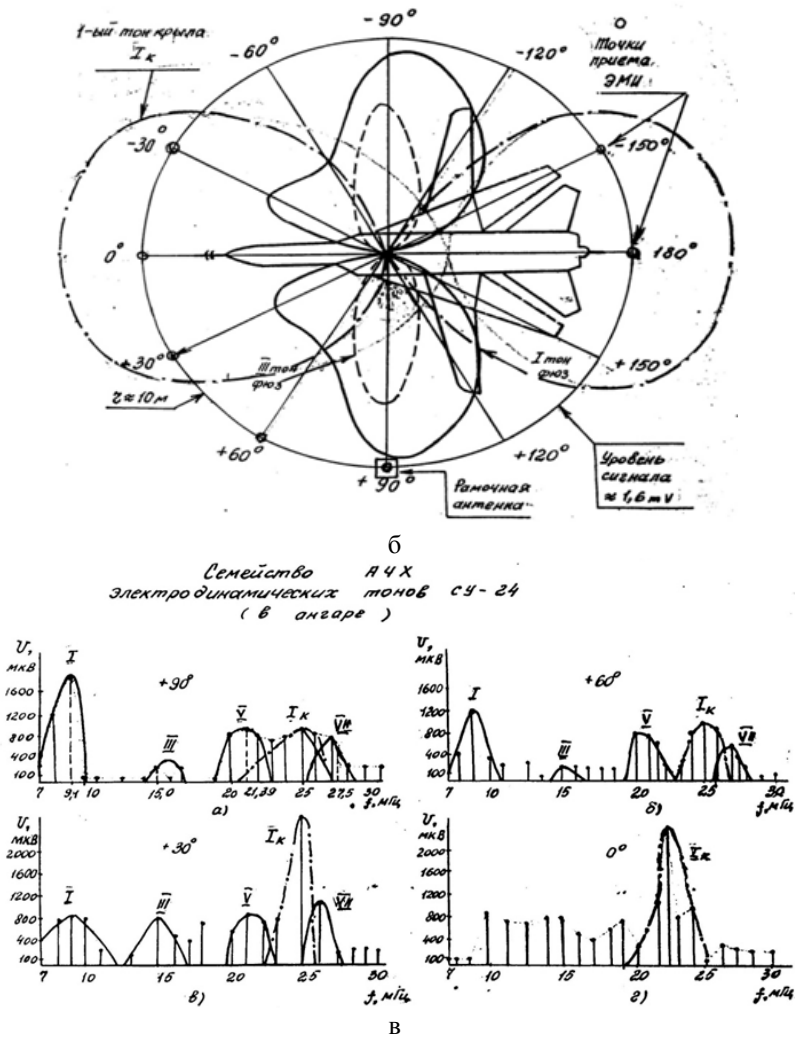


Рис. 5. Схемы: а – одного из экспериментов на самолете Су-24; б – распределения энергии 1-го тона излучений фюзеляжа и крыла самолета; в – распределение энергии излучений нечетных тонов крыла и фюзеляжа

По результатам статических экспериментальных исследований можно утверждать:

1. Подтвердились теоретические расчеты наличия собственных электродинамических тонов на частотах, пропорциональных геометрическим размерам конструкции.
2. Пространственные диаграммы направленности электромагнитного излучения для самолетов Су-24 и Су-27 близки к теоретическим для полуволнового диполя.
3. При возбуждении ЛА через емкостной контакт, напряжением в 1 вольт, электромагнитное излучение самолета надежно фиксировалось на расстоянии в несколько десятков метров.

4. Для исследования электромагнитного излучения ЛА в динамике необходимо разработать датчик-анализатор ЭМИ, позволяющий фиксировать спектральные портреты ЛА в реальном масштабе времени.

Выводы. На основе проведенного анализа результатов выполненных ранее НИР на предмет готовности систем навигации и наведения по пространственным полям к практической реализации можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее близкой к практическому применению является МагКЭНС-1 с использованием модуля вектора напряженности. Ожидаемая погрешность навигации над сушей не более 200 м, над морем – 300–500 м (2 σ).
2. Для внедрения такой системы необходимо создать службу обеспечения сертифицированными данными о параметрах МПЗ. Исходной систематизированной информацией располагает СПб филиал ИЗМИРАН.
3. МагКЭНС-2 сохраняет работоспособность в районах с меньшей информативностью, чем допускает МагКЭНС-1. Для её реализации необходимо провести ОКР по созданию векторной магнитометрической системы. Ожидаемая погрешность навигации на уровне погрешности картографирования МПЗ в плане.
4. Реализация ГравиКЭНС-1 на воздушных судах проблематична в силу проблем разделения вертикальных ускорений объекта и ускорения силы тяжести. Такие системы применимы и находят применение на подводных судах.
5. Для реализации ГравиКЭНС-2 необходимо проведение ОКР по созданию бортового гравиградиентометра с погрешностью измерений не хуже 5 Этвеш (2 σ). Ожидаемая погрешность навигации в пределах 100 м (2 σ).
6. Для реализации системы навигации по электромагнитному ландшафту местности и пассивной локации подвижных объектов в атмосфере необходимо проведение НИР по созданию датчика-анализатора, позволяющего фиксировать спектральные портреты в реальном масштабе времени для последующего исследования информационных свойств радиоизлучений, связанных с электризацией ЛА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Научно-технический отчет по комплексной НИР: Исследования по созданию научно-технического задела для разработки автономных бортовых систем навигации, наведения и целеуказания для объектов В и ВТ на основе комплексного использования информации о физических полях Земли (шифр КНИР «Геофизика-Р») ОАО РПКБ, 2000.
2. НТО по составной части НИР «Геофизика-Р2010» Исследования по картографическому обеспечению КЭСНН по пространственным и поверхностным геофизическим полям. 29 НИИ МО, 2003.
3. НТО по составной части НИР «Геофизика-Р2010» Анализ и исследование методов измерения параметров геомагнитного поля феррозондовым трехкомпонентным магнитометром на борту подвижного ферромагнитного носителя, СПбФ ИЗМИРАН, 2004.
4. Научно-технический отчет по НИР «Геофизика-Р2010» «Исследования по созданию нового поколения измерителей гравитационного, электромагнитного и магнитного полей Земли и бортовых систем автономной навигации на их основе» (шифр «Геофизика-Р2010») ОАО РПКБ, 2006.
5. Джанджгава Г.И., Красовский А.А. Пассивная макроволновая радиолокация, мониторинг, навигация и резервное управление воздушным движением // Тезисы докладов на научной сессии ИПМех РАН. – М., 1998.
6. Красовский А.А., Наумов А.И. Интерферометрическая радиопеленгация как пассивная радиолокация // Известия АН. Т и СУ. – 1997. – № 6. – С. 5-14.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.В. Щербинин.

Джанджгава Гиви Ивлианович – ОАО «Раменское Приборостроительное Конструкторское Бюро»; e-mail: L_Avgustov@rpkb.ru; 140103, Московская область, г. Раменское, ул. Гурьева, 2; тел.: 84955562393; д.т.н.; профессор; президент; генеральный конструктор.

Герасимов Геннадий Иванович – тел.: 84959925695; главный конструктор.

Августов Лев Иванович – тел.: 84964640473; к.т.н.; главный специалист.

Dhzandzhgava Gbvi Ivlianovich – JSC "Ramenskoye Design Company"; e-mail: L_Avgustov@rpkb.ru; 2, Gur'eva street, Ramenskoe, Moscow region, 140103, Russia; phone: +74955562393; dr. of eng. sc.; professor; president; general designer.

Gerasimov Genadij Ivanovich – phone: +74959925695; chief designer.

Avgustov Lev Ivanovich – phone: +74964640473; cand. of eng. sc.; chief specialist.

УДК 778.35:629.7

Ю.Г. Веселов, А.С. Островский, Н.И. Сельвесюк, И.В. Красавин

**ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВЫХ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНЫХ
СИСТЕМ***

Представлен аналитический метод оценки предельного разрешения цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли видимого и инфракрасного диапазонов, основанный на применении теории линейных оптико-электронных систем.

Предложен математический аппарат для реализации оценки возможностей цифровых оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли видимого и инфракрасного диапазонов по критерию максимального значения их предельного разрешения.

Получены зависимости предельных возможностей таких систем от характеристик их аппаратного обеспечения и проведен их детальный анализ.

Определены основные подходы к синтезу параметров цифровых оптико-электронных систем.

Оптико-электронные системы; теория линейных систем; предельное разрешение.

Ju.G. Veselov, A.S. Ostrovskiy, N.I. Selvesyuk, I.V. Krasavin

**ESTIMATION OF THE LIMITING RESOLUTION OF DIGITAL
OPTOELECTRONIC SYSTEMS OF REMOTE SENSING USING THE
THEORY OF LINEAR SYSTEMS**

This paper presents an analytical method of estimation of the limiting resolution of digital electro-optical systems of remote sensing of the visible and infrared ranges, based on the theory of linear electro-optical systems.

A mathematical apparatus for the implementation of digital electro-optical systems for remote sensing of the visible and infrared range capabilities estimation by limiting their maximum resolution.

The dependencies of limiting capabilities of such systems on the characteristics of the hardware were obtained and a detailed analysis was performed.

The main approaches to the synthesis parameters of digital electro-optical systems were defined.

Optoelectronic systems; the theory of linear systems; limiting resolution.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 11-08-00850.