

II. Исследование характеристик навигационных систем

УДК 531.383.11

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРРЕЛЯЦИОННО-
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПО
МАГНИТНОМУ ПОЛЮ ЗЕМЛИ**

Т.В. Сазонова

*АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»,
Раменское, Московская область.
tatsazonova@mail.ru*

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований по оценке точностных характеристик корреляционно-экстремальных навигационных систем по аномальному магнитному полю Земли для летательных аппаратов. Исследования проводились с использованием экспериментального образца магнитометрической системы, в состав которого входили феррозондовый и квантовый магнитометры, инерциально-спутниковая навигационная система и вычислительная среда на базе промышленного ноутбука. Испытания магнитометрической системы проводились на стенде отработки и полунатурного моделирования, а также на летающей лаборатории. Результаты испытаний показали возможность практической реализации корреляционно-экстремальных навигационных систем по аномальному магнитному полю Земли.

Ключевые слова: аномальное магнитное поле Земли, корреляционно-экстремальная навигационная система, феррозондовый магнитометр, квантовый магнитометр.

**EXPERIMENTAL STUDIES OF ACCURACY
CHARACTERISTICS OF CORRELATION-EXTREME
NAVIGATION SYSTEMS BY
THE EARTH'S MAGNETIC FIELD**

T.V. Sazonova

*Joint Stock Company «Ramenskoye Design Company»,
Ramenskoe, Moscow region.*

In the article results of experimental research for accuracy evaluation of anomalous magnetic field correlation and extreme navigation system for aircrafts are considered. During research has been used experimental prototype, consisting of fluxgate and quantum magnetometers, inertial satellite navigation system and computing environment based on of industrial computer. Research of Magnetic navigation system used table simulator and aircraft Lab. Results of experimental re-

search show possibility of anomalous magnetic field correlation and extreme navigation system practical realization.

Key words: anomalous magnetic field of Earth, correlation and extreme navigation system, fluxgate magnetometer, quantum magnetometer.

В последнее время из-за угрозы несанкционированных воздействий стало весьма актуальным требование автономности работы навигационных систем. В этой связи при полете летательных аппаратов (ЛА) над акваториями или малоинформативным рельефом целесообразно использовать корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС) по пространственным полям, к которым относится аномальное магнитное поле Земли (АМПЗ) [1].

Наиболее эффективным методом корреляционно-экстремальной коррекции является поисковое оценивание невязки координат в пределах неопределенности местоположения (доверительной области) [2]. В АО «РПКБ» проводились исследования по разработке подобной КЭНС по АМПЗ, включающие стендовые и летные испытания.

Экспериментальный образец магнитометрической навигационной системы (МНС) предназначен для определения погрешностей измерения пространственного положения ЛА путём экстремальной коррекции координат по результатам сравнения последовательности измерений магнитометров с эталонной информацией об АМПЗ, а также для осуществления контроля экстремальной коррекции в ходе полета и слепополетной обработки параметров МНС. В состав экспериментального образца МНС входили (рис. 1):

- магнитометр цифровой трехкомпонентный феррозондовый МЦТ-7;
- квантовый магнитометр «Аэромастер» (в составе летающей лаборатории);
- инерциально-спутниковая навигационная система (ИСНС) «КомпаНав-3»;
- промышленный ноутбук ЕС-1866.



**Феррозондовый магнитометр
МЦТ-7**



**Малогабаритная ИСНС
«КомпаНав-3»**



**Квантовый магнитометр
«Аэромастер»**



Ноутбук ЕС-1866

Рис. 1. Состав экспериментального образца МНС



Рис. 2. Режимы работы экспериментального образца МНС

Экспериментальный образец МНС имел три основных режима работы (рис.2):

- предполетная подготовка (выставка ИСНС, проверка МЦТ-7, загрузка картографической информации);
- работа (проведение корреляционно-экстремальной обработки, визуализация маршрута на фоне 2D карты и карты АМПЗ);

- послеполетная обработка (визуализация таблиц и графиков зарегистрированных параметров).

Стенд отработки и полунатурного моделирования МНС АО «РПКБ» (рис. 3) включал ведущий имитационный компьютер и обеспечивал проверку работоспособности МНС и ее составных частей, а также имитационное моделирование полета ЛА и формирование выходных данных магнитометров и ИСНС. Стендовые испытания подтвердили работоспособность МНС и ее готовность к летным испытаниям.



Рис. 3. Стенд отработки и полунатурного моделирования МНС



Стингер
с размещенными
датчиками
феррозондового
и квантового
магнитометров



Рис. 4. Легающая лаборатория

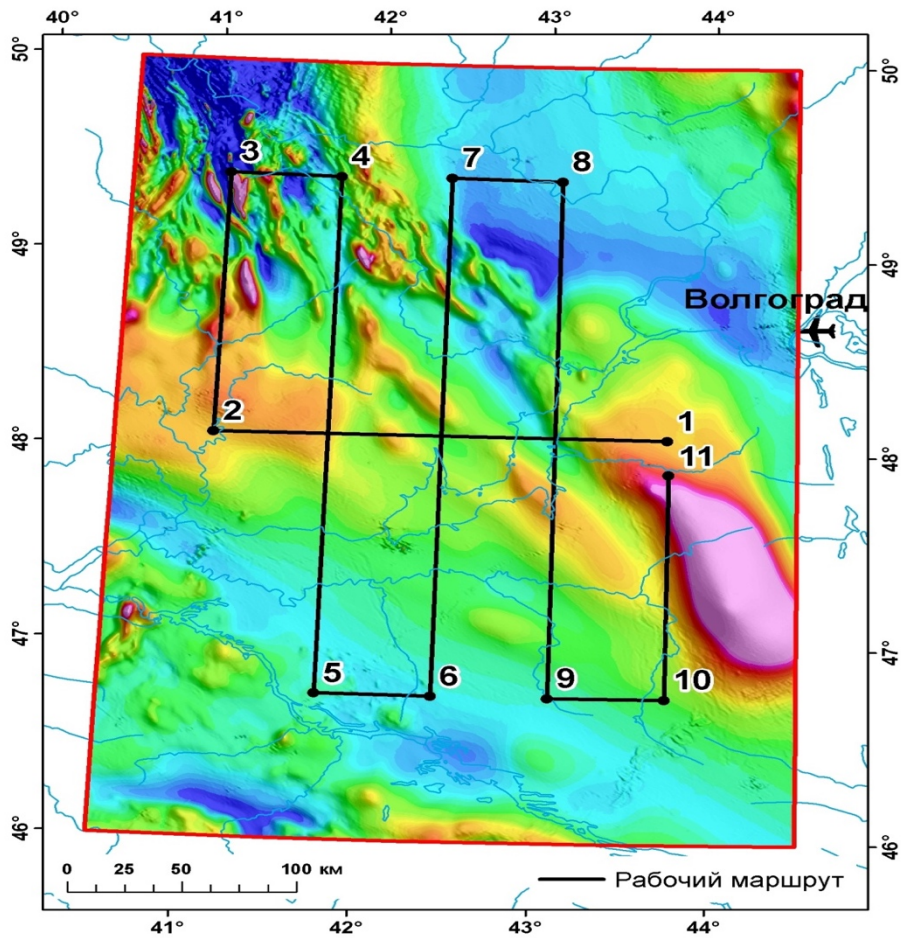


Рис. 5. Карта АМПЗ на район испытаний

Летные испытания МНС в районе г. Волгоград проводились на летающей лаборатории (ЛЛ) АН-30, бортовой номер 30063 (рис. 4). Исходные карты АМПЗ на высоту 450 м на район испытаний, содержащий участки АМПЗ различной информативности (рис. 5), были подготовлены ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова» на основе обработки реальных данных, полученных в ходе полетов в 2009-2010 гг. Для использования в КЭНС карты АМПЗ были преобразованы в бортовой формат [3].

Продолжительность летных испытаний составила 14 дней с 9 по 22 апреля 2018 г. на аэродроме Гумрак (г. Волгоград). Задачами летных испытаний МНС на ЛЛ являлись:

- оценка точности карт АМПЗ на район испытаний по результатам обработки данных квантового магнитометра «Аэромастер»;
- оценка точностных характеристик режима экстремальной коррекции.

Летные испытания проводились в два этапа:

- подготовительный (организационный) этап, в том числе перелет ЛЛ на место испытаний (проведен 9.04.2018 г.), пробный вылет для проверки работы всех приборов в реальных условиях эксплуатации (проведен 13.04.2018 г.) и установка магнитной вариационной станции (проведена 11.04.2018 г.);

- основной этап, в том числе специальный калибровочный вылет для построения модели компенсации девиации (проведен 14.04.2018 г.), обработка данных калибровочного вылета с целью построения модели компенсации девиации (проведена 14.04.2018 г.), испытательные полеты вдоль заданного маршрута на эшелонах:

- 450 м – проведен 15.04.2018 г.;

- 2000 м – проведен 17.04.2018 г.;

- 4000 м – проведен 21.04.2018 г.

В ходе летных испытаний подтверждена работоспособность экспериментального образца МНС во всех режимах, а именно «Предполетная подготовка», «Работа», «Послеполетная обработка».

Во всех полетах в результате корреляционно-экстремальной обработки текущих и эталонных данных АМПЗ были получены достоверные оценки поправок к координатам (рис. 6).

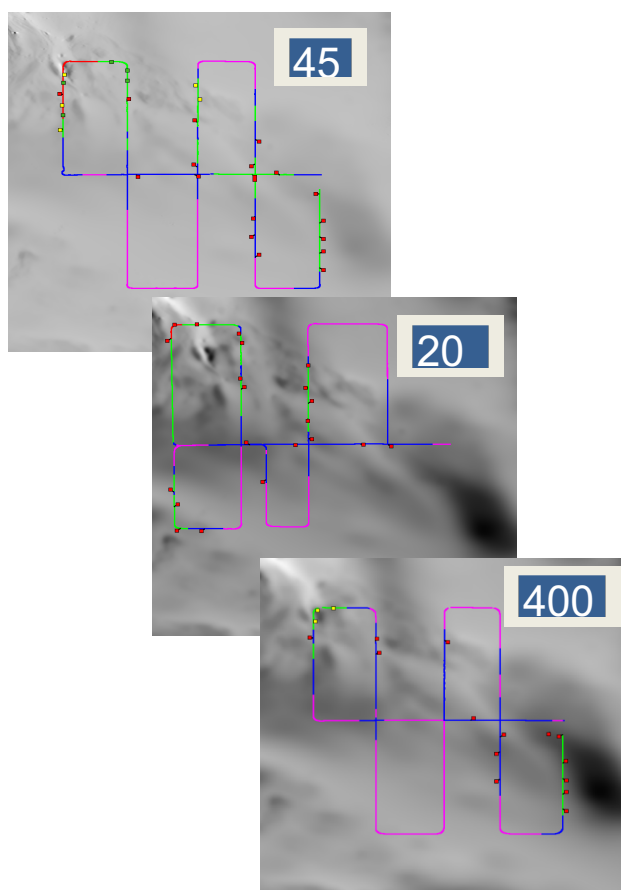


Рис. 6. Маршруты полета и отметки выдачи корректирующих поправок

В период с 23 по 25 апреля 2018 г. в соответствии со штатной методикой для полетов от 15.04.18 (на высоте 450 м), от 17.04.18 (на высоте 2000 м), от 21.04.18 (на высоте 4000 м) была проведена обработка данных квантового магнитометра на персональном компьютере. Ее результаты показали, что ошибки картографирования достигали на интенсивном АМПЗ недопустимых значений в 383 нТл (рис. 7).

Статистические характеристики ошибок картографирования

	МО ошибок картографирования, нТл	СКО ошибок картографирования, нТл	Максимальное отклонение ошибок картографирования, нТл
Слабое поле	-48.07	6.59	18.22
Умеренное поле	-51.47	10.64	64.49
Сильное поле	-46.89	49.77	383.41
По всему маршруту	-48.54	22.74	385.03

Рис. 7. Ошибки картографирования АМПЗ

Для уточнения модели АМПЗ были проделаны следующие операции:

1. Пересчет модели на 20 м вверх, т.к. во время съемок 2009-2010 гг. магниточувствительный датчик располагался в выносной гондole, на трос-кабеле длиной 70 м, полеты проводились на высоте 500 м.

2. Устранение промежуточных пересчетов из географической системы координат в проекцию Гаусса-Крюгера и обратно.

3. Дискрет представления АМПЗ уменьшен с 500 м до 250 м.

Данные меры снизили амплитуду расхождения карты АМПЗ в северо-западной зоне с повышенными вертикальными и горизонтальными градиентами от 383 нТл до 22 нТл.

Дальнейшая обработка зарегистрированных данных экспериментального образца МНС показала следующее:

- на слабом ($\sigma_{мпз} \leq 40$ нТл) и умеренном ($80 \text{ нТл} > \sigma_{мпз} \geq 40$ нТл) АМПЗ ошибки картографирования составляют 7-10 нТл (σ), максимальные отклонения наблюдаются на сильном АМПЗ ($\sigma_{мпз} \geq 80$ нТл) и достигают 22 нТл;

- алгоритмы пересчета АМПЗ на высоту, основанные на преобразовании Фурье [4], работоспособны в реальном масштабе времени на борту ЛА и обеспечивают точность порядка 5 нТл;

- погрешность феррозондового магнитометра МЦТ-7 составила порядка 20 нТл (σ), погрешность квантового магнитометра «Аэромастер» без дополнительной наземной обработки - порядка 8 нТл;

- погрешности экстремальной коррекции МНС (усредненные данные) составляют 588 м (σ) для умеренного АМПЗ и 410 м (σ) для сильного АМПЗ.

Таким образом, стендовые и летные исследования экспериментального образца МНС позволили обосновать структуру и состав КЭНС по АМПЗ, уточнить области ее применения и оценить ожидаемые точностные характеристики.

Для практического внедрения КЭНС по АМПЗ в бортовые комплексы ЛА необходимо обеспечить картографирование АМПЗ на новой технологической и инструментальной основе, для чего нужна отдельная программа работ, результатом которой станет создание и поддержание актуальной базы данных АМПЗ на территорию РФ. Кроме того, необходимо продолжить летные исследования КЭНС по АМПЗ при полете ЛА над акваториями, высокими широтами и на большой высоте.

Литература

1. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. Москва: «Наука». 1985.
2. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных систем. -Москва: «Наука». 1979.
3. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Геоинформация в комплексах бортового оборудования летательных аппаратов. Москва: Научтехлитиздат, 2018.
4. Зорич В.А. Математический анализ.- Москва: Физматлит. 1984.