

УДК 621.38

## РАЗРАБОТКА БАЗОВОГО АЛГОРИТМА ПОДСИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПОЛЯМ

© 2007 В. М. Антимиров

Воронежская государственная лесотехническая академия

Рассматриваются особенности построения алгоритмической основы рельефометрической корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС).

### 1. Описание облика системы коррекции и условий работы

Ошибки системы управления (СУ), определяющие отклонение точки падения от точки прицеливания, приближенно можно выразить следующими формулами [1]:

$$\begin{aligned} \Delta x_{\Sigma} &= \sqrt{\{\Delta x^2 + (\Delta V_x \cdot t_{oc})^2 + (h \cdot a)^2 + ((\Delta h + \Delta V_y \cdot t_{oc}) / tgq)^2 + \Delta x_{ТП}^2\} + \Delta x_{инс}^2 + \Delta x_{cy}^2}; \\ \Delta z_{\Sigma} &= \sqrt{\{\Delta z^2 + (\Delta V_z \cdot t_{oc})^2 + \Delta z_{ТП}^2\} + \Delta z_{инс}^2 + \Delta z_{cy}^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\Delta x$ ,  $\Delta z$ ,  $\Delta h$  - ошибки подсистемы инерциального управления (ПИУ) по плановым координатам и высоте, корректируемые в результате работы КЭНС;  $\Delta V_x$ ,  $\Delta V_y$ ,  $\Delta V_z$  - ошибки ПИУ по скорости, корректируемые в результате работы корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС);  $t_{oc}$  - время движения от точки привязки (середины участка коррекции) до точки падения;  $a$ ,  $g$  - угловые ошибки приборного базиса ПИУ относительно системы координат участка коррекции;  $h$  - средняя высота полета над участком коррекции;  $\Delta x_{ТП}$ ,  $\Delta z_{ТП}$  - ошибки привязки точки прицеливания к участку коррекции, выполняемой по космическим фотоснимкам;  $\Delta x_{инс}$ ,  $\Delta z_{инс}$  - ошибки ПИУ по координатам, накопившиеся после проведения коррекции;  $\Delta x_{cy}$ ,  $\Delta z_{cy}$  - динамические ошибки системы наведения и стабилизации при отработке выявленного промаха;  $q$  - угол наклона траектории в точке падения.

Ошибки  $\Delta x_{\Sigma}$ ,  $\Delta z_{\Sigma}$  являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону. Математические ожидания

$\Delta \bar{x}_{\Sigma}$ ,  $\Delta \bar{z}_{\Sigma}$  определяют положение средней точки попадания (СТП) относительно точки прицеливания. СКО  $s\Delta x_{\Sigma}$ ,  $s\Delta z_{\Sigma}$  характеризуют рассеивание точек падения относительно СТП или кучность. Для СУ, оснащенной системой коррекции по геофизическим полям, СТП всегда совпадает с точкой прицеливания, то есть отсутствуют систематические ошибки. Если не выполнять операцию привязки точки прицеливания к участку коррекции по космическим фотоснимкам, то в ошибках  $\Delta x_{ТП}$ ,  $\Delta z_{ТП}$  появляется систематическая составляющая и СТП уже не будет совпадать с точкой прицеливания. Выражение (1) определяет общий баланс ошибок СУ и в дальнейшем используется как для СУ с системой коррекции, так и без нее. Выражение в фигурных скобках описывает ошибки СУ, на которые система коррекции оказывает влияние

Для выбора алгоритма корреляционно-экстремальной обработки (КЭО), его параметров, логики измерений и профиля траектории необходимо определить критерий эффективности, позволяющий сравнивать альтернативные варианты [1, 2].

Критерий эффективности - это скалярная количественная мера степени соответствия системы ее назначению. Назначением системы является поражение объекта или его жизненно важных точек, поэтому общим критерием эффективности является вероятность поражения. Если аппроксимировать координатный закон поражения симметричной гауссой

$$G(r) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{r}{R_p} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $R_p$  - параметр координатного закона поражения называемый радиусом поражения;  $r$  - расстояние от точки падения до точки прицеливания, то вероятность поражения представляется выражением вида

$$P = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{s\Delta x_{\Sigma}}{R_p}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{s\Delta z_{\Sigma}}{R_p}\right)^2\right)}}. \quad (3)$$

Точность СУ обычно характеризуется одним числом вида

$$s_{\Sigma} = \frac{s\Delta x_{\Sigma} + s\Delta z_{\Sigma}}{2}. \quad (4)$$

Если в (3) положить  $R_p = 3s_{\Sigma}$ , то вероятность поражения будет равна 0,9 при условии  $s\Delta x_{\Sigma} = s\Delta z_{\Sigma}$ . Вероятность попадания в круг радиуса  $R_p$  при том же условии равна 0,98889. Таким образом, выражения (3) и (4) связаны друг с другом и определяют один и тот же критерий и их можно трактовать как сворачивание параметров (1), характеризующих точность СУ, в скалярный критерий. Выражение (4) - это частный критерий, удобный для анализа КЭНС. Он основан на общем критерии (3), применяемым, исходя из назначения системы.

Как указывалось выше, эффективность СУ без коррекции можно характеризовать теми же выражениями (1), (3), (4). При этом в (1)  $a$  и  $g$  полагаются равными нулю, а в ошибках  $\Delta x_{ТП}$ ,  $\Delta z_{ТП}$  появляется систематическая составляющая, которая выносится из-под знака корня.

Работа системы коррекции сводится к оценке ошибок ПИУ по измерениям геофизического поля (ГФП). В общем случае вектор оцениваемых параметров ПИУ имеет вид

$$\mathbf{r}_x = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta v_x, \Delta v_y, \Delta v_z, a, b, g, w_a, w_b, w_g, \Delta a_z, \Delta a_h, \Delta a_x]^T. \quad (5)$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  - ошибки ПИУ по координатам;  $\Delta v_x$ ,  $\Delta v_y$ ,  $\Delta v_z$  - ошибки ПИУ по скоростям;  $a$ ,  $b$ ,  $g$  - ошибки ПИУ по угловому по-

ложению;  $w_a$ ,  $w_b$ ,  $w_g$  - дрейф инерциального базиса;  $\Delta a_y$ ,  $\Delta a_h$ ,  $\Delta a_x$  - ошибки акселерометров.

Идеальная система коррекции должна оценивать весь вектор состояния ПИУ по измерениям ГФП, а также ошибки привязки лучей радиолокатора рельефометрической системы (PPC) к осям ПИУ. Для реальных систем состав оцениваемых параметров ПИУ определяется на начальном этапе проектирования в зависимости от их вклада в общий баланс ошибок (1) и является важнейшей частью задачи выбора или разработки алгоритма КЭО и облика КЭНС.

Точность СУ с коррекцией по ГФП, заданная выражением (4), определяющим образом зависит от высоты и длины участка коррекции. Для баллистического аппарата, движущегося в атмосфере, высота и длина участка коррекции - взаимосвязанные параметры: с уменьшением высоты уменьшается и длина участка коррекции. Поскольку при этом увеличивается разрешение PPC, то существует оптимальная высота участка, при которой ошибка СУ (4) становится минимальной. Важным фактором является также и точность выхода на заданную высоту в начале участка коррекции.

Можно сказать, что точность СУ (4) повышается прямо пропорционально объему информации, содержащемуся в массиве измерений PPC. Этот объем главным образом зависит от длины участка коррекции и разрешения PPC, определяемого диаметром пятна засветки. Число лучей PPC влияет на объем информации только в том случае, если расстояние между центрами пятен засветки боковых лучей больше радиуса корреляции рельефа, сглаженного пятном засветки. Однако при увеличении угла раствора крайних боковых лучей уменьшается разрешение в боковом направлении и увеличивается флуктуационная ошибка PPC и ошибка смещения. Поэтому он ограничен величиной 10-12 градусов. Возможно, разрешение PPC в боковом направлении можно улучшить, если использовать не всю ширину отраженного сигнала, а только его центральную часть. Но это требует проведения оценочных расчетов.

Поскольку точность выхода в начало участка коррекции по высоте имеет большое значение, в том числе и как фактор, увеличивающий длину участка, то в логику измерений целесообразно ввести участок предварительного измерения высоты еще в достаточно плотной плазме. В этом случае момент включения РРС на излучение необходимо формировать по достижению заданной скорости. Для максимального использования потенциала РРС на этом участке передатчик должен работать на один центральный луч, а количество накапливаемых в процессе обработки импульсов необходимо увеличить. Этот дополнительный участок позволит существенно повысить точность выхода по высоте на начало основного участка. Кроме того, эти дополнительные измерения можно использовать для повышения точности коррекции на основном участке, если их ввести в решающую функцию с соответствующими весами, вид которых уточняется в дальнейшем:

$$g_k = \frac{u_{mk}^s / S_e}{(d_{mk} \cdot q_{0,5})^2}, \quad (6)$$

где  $k$  – номер измерения (дискретное время);  $m$  – номер луча;  $u_{mk}^s$  – энергия принятого сигнала  $m$ -го луча в момент  $k$  (яркость);  $S_e$  – СКО шума;  $d_{mk}$  – измеренная дальность до подстилающей поверхности вдоль  $m$ -го луча в момент  $k$ ;  $q_{0,5}$  – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) по уровню половинной мощности.

После основного участка коррекции РРС можно также не отключать и работать на один центральный луч и на участке пикирования. Если на конечном участке летательный аппарат (ЛА) интенсивно маневрирует по крену, то используются измерения луча, который ближе всех к вертикали. Эти дополнительные измерения так же, как и на предварительном участке, возможно, позволят повысить конечную точность как за счет увеличения объема информации, так и за счет уменьшения оставшегося времени  $t_{oct}$  в (1).

Эффективность использования конечного участка для повышения точности оценивается на математической модели системы коррекции.

Таким образом, в логику измерений целесообразно ввести три участка и с учетом этого выбрать оптимальный профиль траектории, то есть высоту начала участка коррекции, его длину и угол наклона траектории.

В конечную точность (4) вносит свой вклад не только собственно алгоритм КЭО, но и профиль траектории, логика измерений и способ обработки сигнала РРС. Поэтому необходим системный подход к выбору облика системы коррекции и ее параметров. Выбор облика системы должен начинаться с анализа общего баланса ошибок (1) и чувствительности каждой составляющей к тому или иному техническому решению. Идеальным средством для такого системного проектирования является имитационная математическая модель системы коррекции, в которую входит подробная модель РРС, модель ГФП, бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и модель движения ЛА. Испытания на летающей лаборатории используются для подтверждения правильности принятых технических решений и идентификации некоторых трудно формализуемых параметров математической модели. Степень совпадения точности системы коррекции, полученной на летных испытаниях, с данными математической модели является критерием ее адекватности.

## 2. Обзор известных алгоритмов

Все алгоритмы КЭО можно разделить на две большие группы: поисковые и беспоисковые [3-7]. Основу беспоисковых алгоритмов составляет обобщенный фильтр Калмана (ОФК), позволяющий непрерывно оценивать весь вектор параметров ПИУ, заданный выражением (5). Принято считать [4-7], что фильтр Калмана является оптимальным в том смысле, что не существует другого алгоритма, обеспечивающего более высокую точность по критерию (4). Недостатком этого алгоритма является то, что начальная зона неопределенности по положению должна быть небольшой, меньше радиуса корреляции рельефа. Это условие для реальных СУ

с ПИУ, и особенно с БИНС, никогда не выполняется. Поэтому на первом этапе работы системы коррекции может быть использован только поисковый алгоритм, основанный на переборе гипотез в пространстве оцениваемых параметров ПИУ (4). Для каждой гипотезы вычисляется значение решающей функции, являющейся мерой близости от данной гипотезы до истинной, для которой решающая функция принимает экстремальное значение. Очевидно, что сплошной перебор гипотез во всем пространстве параметров ПИУ принципиально невозможен в силу «проклятия размерности», и развитие вычислительной техники вряд ли изменит это положение даже в отдаленной перспективе. Попытка обойти эту трудность путем использования методов математического программирования для поиска глобального экстремума решающей функции наталкивается на проблему сходимости метода [3].

Разработчики первых систем коррекции решали проблему размерности путем сведения многомерного перебора к двумерному перебору гипотез только по плановым координатам. Для систем коррекции с многолучевым радиовысотомером перебор по вертикальной координате устранялся введением небольшого предварительного участка измерения высоты. Кроме того, выделение из измеренного профиля рельефа линейного тренда позволяет достаточно точно оценить параметры  $\Delta u$  и  $\Delta v_y$  из (5).

Измеренные профили рельефа вдоль трасс центров пятен засветки рассматриваются как измеренная текущая карта местности (ТКМ). При двумерном переборе гипотез влияние не оцениваемых параметров ПИУ из (5) сводится к искажениям ТКМ, главные из которых – поворот ТКМ, вызванный ошибкой  $\Delta v_z$ , и искажение масштаба, вызванное ошибкой  $\Delta v_x$ . Большие величины этих искажений при коротких малоинформативных участках коррекции приводят к захвату боковых лепестков решающей функции (ложных экстремумов) и ставят проблему надежности привязки наряду с точностью. Эта проблема решалась ужесточением требований к ПИУ по всем не оцениваемым параметрам.

Точные платформенные ПИУ этим требованиям всегда удовлетворяли. Ясно также, что не оцениваемые параметры ПИУ всегда ухудшают конечную точность (4) поисковых алгоритмов как по причине их прямого влияния (1), так и по причине уменьшения крутизны главного лепестка решающей функции в области экстремума.

Повышение точности поисковых алгоритмов за счет расширения пространства перебора было невозможно из-за крайне ограниченных возможностей специализированного вычислительного устройства (СВУ) системы коррекции. В такой ситуации усилия проектировщиков КЭНС были направлены на разработку алгоритмов, устойчивых к масштабным и угловым искажениям. Достаточно полный обзор этих методов изложен в [10]. Но уже был очевиден путь значительного повышения точности системы коррекции и доведения ее до потенциально возможного уровня за счет использования многоэтапных комбинированных алгоритмов [1, 6] и извлечения дополнительной информации из сигнала некогерентного многолучевого радиовысотомера.

На первом этапе используется поисковый алгоритм со сплошным перебором гипотез с крупным шагом по плановым координатам и, если позволяет вычислительное устройство, то и по скорости. Первый этап заканчивается выдачей в центральный вычислитель СУ грубой поправки, которая сразу же отрабатывается. На втором этапе предпочтительно должен использоваться беспоиcковый алгоритм на основе обобщенного фильтра Калмана как имеющий наивысшую достижимую точность. Возможно построение многоэтапного алгоритма, у которого на втором этапе используется тот же поисковый алгоритм, что и на первом этапе, но с уменьшенным шагом перебора гипотез. Такой способ построения многоэтапных алгоритмов рассматривался в НПОА в конце восьмидесятых годов как дальнейшее развитие системы коррекции.

Нынешний этап развития СУ ЛА характеризуется всеобщей тенденцией использования малогабаритных БИНС вместо платформенных инерциальных систем (ИНС).

При этом обязательным требованием является комплексирование БИНС с какой-нибудь системой коррекции (чаще всего с СНС) на основе ОФК. Но точность БИНС по всем параметрам (5) на порядок и более хуже, чем у платформенных ИНС. Поэтому необходимо практически заново провести весь объем расчетно-теоретических работ по исследованию алгоритмов КЭО и достижимой точности для СУ на основе БИНС и РРС.

Дополнительная информация, которую можно извлечь из сигнала РРС, не изменяя ее конструкции, – это уровень отраженного сигнала (радиояркость), доплеровский сдвиг частоты и спектр огибающей. Использование доплеровского сдвига частоты для оценки ошибок БИНС по скорости может быть весьма полезным, но требует проведения расчетно-теоретических работ для оценки его эффективности. Доплеровский сдвиг, возможно, может быть использован и для алгоритмического повышения разрешения РРС [8, 9], что позволит существенно увеличить объем информации в измеренной ТКМ. Это также требует проведения большого объема расчетно-теоретических работ.

Извлечение таких параметров, как радиояркость и спектр огибающей, в принципе ставит вопрос о возможности использования дополнительного ГФП – поля радиояркостных контрастов земных покровов. В силу сезонно-погодной изменчивости радиояркостного поля вся необходимая информация содержится только в границах, разделяющих однородные контрастные зоны. Был разработан алгоритм навигации по границам радиояркостных контрастов и комплексирования этих данных с данными рельефометрического канала КЭНС. Его эффективность проверялась в самолетных испытаниях по границам перепадов высот зданий городской застройки при полете на небольшой высоте.

Однако для обнаружения момента пересечения радиояркостной границы таких объектов, как дороги и реки, требуется очень высокое разрешение РРС и большая частота выдачи данных при достаточно большой высоте полета. Обеспечение этих условий – крайне трудоемкая задача. В любом случае оценка эффективности использования радио-

яркостного поля требует проведения весьма значительного объема не только расчетно-теоретических работ, но и экспериментов на летающей лаборатории.

Радиояркость, извлекаемая из сигнала РРС, может оказаться полезной и для рельефометрической КЭНС. Измерения дальности до подстилающей поверхности имеют разную точность в различных точках траектории и для различных лучей. Точность измерения дальности зависит от отношения сигнал-шум, а сигнал – это радиояркость. Следовательно, измеряя радиояркость, можно каждому измерению присвоить вес, пропорциональный яркости. Кроме того, одна из составляющих ошибки смещения РРС зависит от типа подстилающей поверхности, а следовательно, и от яркости, что можно учитывать в алгоритме КЭО для повышения его точности.

### 3. Разработка базового поискового алгоритма КЭО

Рельефометрическая КЭНС работает на основе сравнения измеренного профиля рельефа с эталонными профилями, вычисляемыми по эталонной карте местности (ЭКМ). Измеренная высота рельефа и координаты точки пересечения осей ДНА с земной поверхностью по данным БИНС в  $k$ -ый момент времени для середины временного интервала накопления отраженных импульсов вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} h_{mk}^{uz} &= y_k + d_{mk} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{r}}(2)_{mk}; \\ x_{mk}^{uz} &= x_k + d_{mk} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{r}}(1)_{mk}; \\ z_{mk}^{uz} &= z_k + d_{mk} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{r}}(3)_{mk}; \end{aligned} \quad (7)$$

где  $x_k, y_k, z_k$  – положение центра масс ЛА в системе координат ЭКМ;  $d_{mk}$  – дальность до подстилающей поверхности, измеренная лучом с номером  $m$ ;  $\mathbf{e}^{\mathbf{r}}_{mk}$  – орт луча  $m$  в системе координат (СК) ЭКМ в момент  $k$ ;  $x_{mk}^{uz}, z_{mk}^{uz}$  – координаты точки пересечения луча  $m$  в СК ЭКМ;  $h_{mk}^{uz}$  – измеренная высота рельефа для луча  $m$ .

Относительно точки  $x_k, z_k$  строится двумерная сетка гипотез о положении центра масс ЛА с шагом перебора гипотез  $\Delta$ .

Предполагается, что ошибка ИНС по высоте частично скомпенсирована на предварительном участке коррекции, и поэтому гипотезы по высоте не строятся.

Для каждой гипотезы в узлах сетки вычисляется эталонная высота  $h_{mkij}^{эт}$  из ЭКМ и решающая функция вида

$$F_{ij} = \frac{1}{N \cdot m \cdot m} \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^m \sum_{\substack{i=1, \\ j=1}}^{im, jm} \left( h_{mk}^{uz} - \bar{h}_{mk}^{uz} - h_{mkij}^{эт} \right)^2, \quad (8)$$

где  $N$  - количество измерений;  $m$  - число лучей;  $k$  - номер текущего измерения (дискретное время);  $i, j$  - номера узлов гипотезной сетки;  $im, jm$  - размер гипотезной сетки;  $\bar{h}_{mk}^{uz} = a_m + b_m \cdot k$  - среднее значение в измеренном профиле рельефа.

Здесь среднее значение - это линейный тренд измеренного профиля. Коэффициенты  $a_m, b_m$  вычисляются рекуррентным методом наименьших квадратов и представляют собой линейные составляющие суммарной ошибки БИНС и РРС.

При такой записи решающей функции предполагается, что линейный тренд выделен и в ЭКМ, в противном случае линейный тренд выделяется из разности измеренного и эталонного профиля. В таком представлении измеренный и эталонный профили рельефа рассматриваются как центрированные псевдослучайные процессы.

Для истинного местоположения решающая функция (8) принимает минимальное значение. Поскольку истинное значение минимума находится между узлами гипотезной сетки, то в окрестности минимальной гипотезы решающая функция аппроксимируется поверхностью второго порядка методом наименьших квадратов и точка ее минимума принимается за оценку местоположения. Можно также в окрестности минимальной гипотезы вычислять центр тяжести решающей функции. Процедура уточнения координат по центру тяжести, известная как алгоритм цен-

троиды, широко применяется в оптических системах обнаружения и измерения координат точечных объектов. Поправки к показаниям ИНС  $\Delta y$  и  $\Delta V_y$  вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \Delta y &= \frac{1}{m \cdot m} \sum_{m=1}^m a_m; \\ \Delta V_y &= \frac{1}{m \cdot m} \sum_{m=1}^m b_m. \end{aligned} \quad (9)$$

Рассмотренный базовый алгоритм очень близок к классическому корреляционному алгоритму с центрированием и нормированием.

Из теории статистических решений [3-5] следует, что этот алгоритм является оптимальным для некоторых специфических условий, а именно: ИНС имеет ошибки только по положению, все остальные ошибки в (5) отсутствуют; гипотезы равновероятны; ошибки измерений радиовысотомера и ЭКМ являются флуктуационными, стационарными, некоррелированными; нет ошибок смещения, зависящих от рельефа и типов земных покровов; все измерения равноточные. Очевидно, что для любой реальной системы коррекции эти условия никогда не выполняются и, следовательно, алгоритм (8) не является оптимальным, то есть не обеспечивает предельно достижимую точность в смысле (4) при имеющемся объеме информации в измерениях радиовысотомера.

Как указывалось выше, предельно достижимую точность обеспечивает только двухэтапный алгоритм, на втором этапе которого используется беспойсковый алгоритм на основе ОФК. Поэтому назначением поискового алгоритма является обеспечение условий работы ОФК второго этапа. Исходя из этого, и должны быть сформулированы требования к поисковому алгоритму первого этапа как к алгоритму предварительной коррекции.

Несмотря на то, что эвристический алгоритм (8) является предварительным, он может и должен быть улучшен. Это необходимо главным образом для предельного уменьшения длительности первого этапа с

тем, чтобы как можно раньше перейти ко второму этапу с ОФК, когда коррекция становится непрерывной, а основная величина промаха уже выявлена и обрабатывается СУ. Раннее выявление основной части промаха значительно повышает устойчивость СУ к противодействию работе РРС.

#### 4. Пути повышения точности рельефометрической КЭНС

Для учета ошибок измерений из-за разности точности каналов решающая функция (8) записывается с весами в виде

$$F_{ij} = \frac{1}{N \cdot mm} \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^{mm} \sum_{\substack{i=1, \\ j=1}}^{im, jm} g_{mk} (h_{mk}^{uz} - \bar{h}_{mk}^{uz} - h_{mkij}^{st})^2;$$

$$g_{mk} = \frac{(u_{mk}^s / s_e) / (d_{mk} \cdot q_{0,5})^2}{\sum_k \sum_m u_{mk}^s / (d_{mk} \cdot q_{0,5})^2}; \quad (10)$$

$$\bar{h}_{mk}^{uz} = a_m + b_m \cdot k,$$

где  $N$  - количество измерений;  $mm$  - число лучей;  $u_{mk}^s$  - энергия принятого сигнала в момент  $k$  (яркость);  $s_e$  - СКО шума;  $d_{mk}$  - измеренная дальность до подстилающей поверхности  $m$ -го луча в момент  $k$ ;  $q_{0,5}$  - ширина ДНА по уровню половинной мощности;  $h_{mk}^{uz}$  - измеренная высота рельефа для луча  $m$  по данным БИНС;  $h_{mkij}^{st}$  - высота рельефа из ЭКМ для луча  $m$  и гипотезы с номером  $i, j$ ;  $k$  - номер измерения;  $m$  - номер луча.

В процессе исследований вид весовых коэффициентов (10) был уточнен.

При больших ошибках БИНС по составляющим скорости  $\Delta v_x$ ,  $\Delta v_z$  на малоинформативных участках может возникнуть ситуация, когда уровень боковых лепестков решающей функции (10) будет превышать уровень главного лепестка. Может потребоваться весьма значительная длина участка коррекции, когда уровень главного лепестка превысит уровень боковых на заданную величину. В этом случае основной промах будет выявляться поздно и может не хватить времени для проведения второго этапа коррекции на

основе ОФК. Для того, чтобы избежать такой ситуации, необходимо имеющийся ресурс вычислителя использовать на перебор гипотез по скорости  $\Delta v_z$  или даже по  $\Delta v_x$  и  $\Delta v_z$ .

Для того, чтобы сравнивать получающуюся точность поискового алгоритма с потенциально достижимой, необходимо вернуться к вопросу о разработке оптимального поискового алгоритма на основе теории статистических решений для полного комплекса условий работы реальной КЭНС.

Точность измерений центрального луча в (10) будет выше, если сопровождение отраженного сигнала производится не по центру тяжести огибающей, а по переднему фронту. В этом случае ошибки БИНС по углам и ошибки юстировки оси ДНА центрального луча не влияют на точность КЭНС. Кроме того, вследствие возникающего стробирования энергия отраженного сигнала собирается не со всего пятна рассеяния, а только в относительно небольшой окрестности подрадарной точки. Следовательно, разрешение центрального луча выше, чем у боковых, и по центральному лучу поступает больший поток информации. Если к тому же ширину следящих стробов изменять адаптивно в зависимости от уровня принятого сигнала, то в последней части участка коррекции, имеющей меньшую высоту, разрешение центрального луча можно еще больше повысить.

Поскольку земные покровы не являются строго ламбертовскими отражателями и в отраженном сигнале наряду с диффузной имеется зеркальная составляющая, то уровень отраженного сигнала центрального луча всегда выше, чем у боковых и, следовательно, выше отношение сигнал/шум.

Разрешение боковых лучей в боковом направлении тоже можно повысить, если ввести стробирование относительно центра тяжести отраженного сигнала. Такая возможность у боковых лучей меньше, чем у центрального из-за влияния зеркальной составляющей отраженного сигнала.

Возможно, и в продольном направлении разрешение боковых лучей можно повысить, если использовать доплеровский сдвиг час-

тоты и так называемый алгоритм сверхразрешения [8,9].

Для каждого момента поступления данных и вычисления решающей функции (10) выполняется поиск локальных экстремумов во всей зоне неопределенности. Когда глобальный экстремум решающей функции станет меньше локальных на заданную величину, положение глобального экстремума уточняется либо по алгоритму центроиды, либо путем аппроксимации решающей функции поверхностью второго порядка. Вычисляются поправки к показаниям БИНС, и СУ начинает обрабатывать выявленный промах. На этом заканчивается первый этап коррекции и КЭНС переходит на второй этап, основанный на ОФК и непрерывной коррекции. Измерения, выполненные на первом этапе основного и предварительного участка, не теряются, а запоминаются в стойком ОЗУ, возможно со сжатием, и используются на втором этапе.

Как следует из сказанного, первый этап коррекции является адаптивным, его длительность не задана жестко, а зависит от информативности рельефа, по которому проходят трассы центров пятен засветки. Коррекция основного промаха выполняется сразу, как только выполняются условия по надежности привязки, которая определяется вероятностью захвата ложного экстремума решающей функции (ее бокового лепестка).

#### Список литературы

1. Гурский Б. Г. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов сухопутных войск / Б. Г. Гурский, М. А. Лющанов, Э. П. Спиринов и др. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2001.

2. Антимиров В. М. Вопросы построения специализированных вычислителей для задач навигации по картам местности / В. М. Антимиров // Материалы XIV конференции памяти Н. Н. Острякова. – Ленинград: ЦНИИ «РУМБ». – 1985. – С.25-28.

3. Белоглазов И. Н. Основы навигации по геофизическим полям / И. Н. Белоглазов, Г. И. Джанджгава, Г. П. Чигин. – М.: «Наука», 1985.

4. Красовский А. А. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем / А. А. Красовский, И. Н. Белоглазов, Г. П. Чигин. – М.: «Наука», 1979.

5. Белоглазов И. Н. Корреляционно-экстремальные системы / И. Н. Белоглазов, В. П. Тарасенко. – М.: «Сов. Радио», 1974.

6. Силаев А. И. Комбинированный алгоритм оценивания в корреляционно-экстремальных навигационных системах / А. И. Силаев, В. А. Стефанов, Г. П. Чигин // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1984. – №6. – С. 12-16.

7. Баклицкий В. К. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных навигационных системах / В. К. Баклицкий, А. Н. Юрьев. – М.: «Радио и связь», 1986.

8. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: от редукции к идеальному прибору в физике и технике. – М.: «Сов. Радио», 1979.

9. Василенко Г. И. Восстановление изображений / Г. И. Василенко, А. И. Тараторкин, В. М. Гинзбург. – М.: Радио и связь, 1986.

10. Бочкарев А. М. Корреляционно-экстремальные навигационные системы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – №9. – С.19-23.

## DEVELOPING THE BASIC ALGORITHM OF GEOPHYSICAL FIELD CORRECTION SUBSYSTEM

© 2007 V. M. Antimirov

Voronezh State Forestry Technological Academy

The paper discusses the peculiarities of constructing the algorithmic foundation of a relief correlation-extreme navigational.