

УДК 621.396
DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-171-180

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КЭСН ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО МИКРОВОЛНОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ПОКРОВОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В.И. ТРОИЦКИЙ¹

¹*Московский государственный университет геодезии и картографии,
г. Москва, Россия*

Приведены результаты численных экспериментов на математической модели корреляционно-экстремальной системы навигации (КЭСН) летательного аппарата (ЛА), использующей микроволновое излучение земных покровов. Целью проведенных численных экспериментов был анализ влияния основных параметров КЭСН (характеристики радиометра и антенны, способы обзора пространства, параметры текущего изображения и эталонного изображения), методов обработки изображения (алгоритмы корреляции изображений), условий работы аппаратуры (скорость и высота полета ЛА, эволюции носителя) на эффективность работы КЭСН. Эксперименты проводились с полями подстилающей поверхности трех типов: с искусственно синтезированной картой, содержащей ряд объектов, отличающихся радиотепловым контрастом; с однородным случайным полем, с фрагментами цифровой карты объектового состава реального участка земной поверхности. В результате численных экспериментов исследовалось влияние на точностные характеристики КЭСН навигационных параметров (углы крена, тангажа, рыскания), высоты и скорости полета, шумов радиометра, ширины диаграммы направленности, ширины сектора обзора, размасштабирования и углового рассогласования текущего и эталонного изображений. По результатам моделирования проведено сравнение различных способов сканирования поверхности. При проведении экспериментов осуществлялась вариация одного из параметров относительно базовых вариантов параметров и оценивались значения и дисперсии ошибок КЭСН. Рассматривались все три основных метода сканирования лучом (продольное с использованием многолучевого радиометра, коническое и поперечное). Операция поиска максимума была составлена из двух процедур: поиска области глобального максимума корреляционной матрицы путем перебора всех значений матрицы и уточнения местоположения точки истинного максимума путем квадратичной интерполяции функции. Рассмотрены реализации ошибок при различных траекториях движения воздушного судна, а также при различных дисперсиях углов. Обработка реализации показала, что увеличение дисперсии углов приводит к одновременному росту как модуля ошибки, так и дисперсии модуля ошибки. Анализ полученных зависимостей показывает достаточно устойчивую тенденцию снижения ошибок КЭСН при уменьшении навигационных углов. Эта зависимость продемонстрирована графически. Для того, чтобы оценить только влияние флуктуационного шума радиометра на величину ошибок КЭСН, была проведена серия экспериментов, при которых все остальные случайные флуктуации в канале исключались.

Ключевые слова: навигация, моделирование, микроволновое излучение, информативность излучения земных покровов.

ВВЕДЕНИЕ

С использованием разработанной модели радиотепловой КЭСН [1] был выполнен большой объем численных экспериментов.

При проведении экспериментов по математическому моделированию не ставилась цель осуществить детальное исследование всех факторов и эксплуатационных ситуаций, хотя эксперименты позволили выделить ряд параметров, которые в наибольшей степени сказываются на эффективности КЭСН, определить допустимые диапазоны измерения, а также определить те параметры, влияние которых незначительно.

МОДЕЛЬ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Эксперименты проводились с полями подстилающей поверхности трех типов [1, 2]:

1) с искусственно синтезированной картой (ИСК), содержащей ряд объектов, отличающихся радиотепловым контрастом;

2) с однородным случайным полем (ОСП), имеющим автокорреляционную функцию вида $R_\lambda(\xi, \eta) = \sigma_\lambda^2 \exp[-(\alpha_x^{-1}|\xi| + \alpha_y^{-1}|\eta|)]$, где σ_λ – заданное среднеквадратичное значение пульсаций радиояркостного поля; α_x, α_y – интервалы корреляции поля соответственно по горизонтали и вертикали;

3) с фрагментами цифровой карты объектового состава (ЦКОС) реального участка земной поверхности.

Результатом экспериментов являлось определение ошибок КЭСН по горизонтали ε_x и по вертикали ε_y , а также модуля ошибки $|\xi|$.

В связи с тем, что одно конкретное значение ошибок является случайной величиной и не может характеризовать среднюю точность КЭСН, в каждом эксперименте проводилась серия опытов, отличающихся друг от друга траекторией движения ЛА. Усреднение по всем опытам позволило вычислить средние значения ошибок, их среднеквадратичный разброс, а также средний модуль и среднеквадратичное значение модуля ошибок.

Выбор различных случайных траекторий движения ЛА осуществлялся двумя способами [4]:

- заданием параметров случайных эволюций движения ЛА, определяющих изменения углов тангажа, крена и рыскания. При этом углы крена, тангажа и рыскания являются случайными процессами с АКФ типа $\sigma_\beta^2 \exp(-\alpha_p / t) \cos \omega_\beta t$;

- различными начальными координатами ЛА. При этом углы тангажа, крена и рыскания были фиксированы.

При проведении экспериментов осуществлялась вариация одного из параметров относительно базовых вариантов параметров и оценивались значения и дисперсии ошибок КЭСН. Рассматривались все три основных метода сканирования лучом (продольное с использованием многолучевого радиометра, коническое и поперечное).

В статье рассмотрены вариации следующих параметров: навигационных (углы крена, тангажа и рыскания и высоты полета); скорости полета; шумов радиометра; ширины диаграммы направленности; ширины сектора обзора; масштабирования текущего изображения (ТИ) и эталонного изображения (ЭИ); степени углового рассогласования ТИ и ЭИ.

По результатам моделирования было осуществлено сравнение рассмотренных методов сканирования [3].

В связи с тем, что в рассмотренных моделях присутствует большое число варьируемых факторов, такая многомерность модели затрудняет возможности получения обозримых результатов и сопоставления значимости факторов, влияющих на величину ошибки КЭСН. В ходе исследований была отработана методика проведения многофакторного эксперимента (анализ совместного влияния углов тангажа, крена и рыскания, высоты полета и ширины диаграммы направленности на точность КЭСН, анализ совместного влияния параметров атмосферы).

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОШИБОК КЭСН

При использовании взаимно корреляционной функции в качестве меры сходства между текущим и эталонным изображениями операция оценки ошибок КЭСН сводится к поиску по-

ложения максимума корреляционной матрицы $\rho(i\Delta\varepsilon_1, k\Delta\varepsilon_2)$, $i, k = \overline{1, N}$, где $\Delta\varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2$ – соответственно сдвиги по горизонтали и вертикали текущего изображения относительно эталона; N – размер матрицы.

Операция поиска максимума была составлена из двух процедур [5]:

- 1) поиска области глобального максимума корреляционной матрицы $\rho(i\Delta\varepsilon_1, k\Delta\varepsilon_2)$, $i, k = \overline{1, N}$ путем перебора всех значений матрицы;
- 2) уточнения местоположения точки истинного максимума путем квадратичной интерполяции функции $\rho(i\Delta\varepsilon_1, k\Delta\varepsilon_2)$ [1].

Отметим, что применение интерполяционной процедуры дает возможность не только более точно оценить ошибки системы, но и получить ошибки в виде непрерывных величин, что достаточно важно при исследовании характеристик КЭСН.

Уточненная ошибка КЭСН $\tilde{\varepsilon}_j$, полученная с помощью квадратичной аппроксимации в соответствии с [1], имеет вид $\tilde{\varepsilon}_j = 0,5\Delta\varepsilon_j \frac{\rho(\varepsilon_{j,3}) - \rho(\varepsilon_{j,1})}{2\rho(\varepsilon_{j,2}) - \rho(\varepsilon_{j,1}) - \rho(\varepsilon_{j,3})}$.

Величина $\tilde{\varepsilon}_j$ ошибки КЭСН по горизонтали ($j = 1$) и по вертикали ($j = 2$). Полная ошибка $\tilde{\delta}_j$ КЭСН равна $\tilde{\delta}_j = n_j\Delta\varepsilon_j + \tilde{\varepsilon}_j$, где n_j – число узлов сдвига глобального максимума относительно центра корреляционной матрицы $\rho(i\Delta\varepsilon_1, k\Delta\varepsilon_2)$.

Именно эта формула и использовалась в экспериментах по моделированию КЭСН. Помимо величин $\tilde{\varepsilon}_j$ и $\tilde{\delta}_j$ вычислялся также модуль $|\delta| = \sqrt{\tilde{\delta}_1^2 + \tilde{\delta}_2^2}$.

Поскольку одна конкретная ошибка не может характеризовать всей точности КЭСН, то для объективной оценки в каждом эксперименте проводилась серия опытов при различных траекториях движения платформы. При статистической обработке реализации ошибок, полученных в серии опытов, находились средние величины $\tilde{\varepsilon}_j$ и $\tilde{\delta}_j$, а также их среднеквадратичные значения.

Рассмотрим подробнее результаты выполненных экспериментов. Будем рассматривать модель многолучевого радиометра, а затем отметим особенности получаемых результатов для случаев конического и поперечного сканирования. Будем также указывать, какие модели подстилающей поверхности использовались в конкретном эксперименте [6].

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ РАБОТЫ АППАРАТУРЫ

Влияние эволюции летательного аппарата

Случайные изменения углов тангажа, крена и рыскания приводят к тому, что координаты текущего изображения, зависящие от этих углов, также будут некоторыми случайными функциями времени. В свою очередь, флуктуации координат приводят к появлению дополнительных ошибок привязки КЭСН. Эксперименты проводились с ИСК, и здесь важно отметить, что результат каждого опыта в эксперименте с ИСК носит частный характер и зависит от того, в какой фрагмент карты попадает пятно антенны. Поэтому даже статистики, построенные по ансамблю реализации (т. е. при различных траекториях движения платформы), не будут иметь общего характера. Это означает, в частности, что при сканировании иных объектов местности могут быть получены другие количественные характеристики объектов. Рассмотрены реализации ошибок $\varepsilon_x, \varepsilon_y, |\varepsilon|$ при различных траекториях движения ЛА, а также при различных дисперсиях углов (рис. 1).

Обработка реализации показала, что увеличение дисперсии углов приводит к одновременному росту как модуля ошибки, так и дисперсии модуля ошибки. Этот факт, с одной стороны, не является чем-то неожиданным, а с другой – свидетельствует о том, что при разработке реальных КЭСН при значительных эволюциях ЛА следует применять либо гиросtabilизированные платформы, либо поиск максимума осуществлять не только путем взаимных сдвигов \bar{C} текущего и эталонного изображения, но и путем более общего преобразования $A\bar{x} + \bar{C}$, где $A = \alpha B_1 B_2 B_3$; α – скаляр изменения масштаба; B_1, B_2, B_3 – матрицы, учитывающие повороты вокруг осей платформы на углы тангажа, крена и рыскания [7].

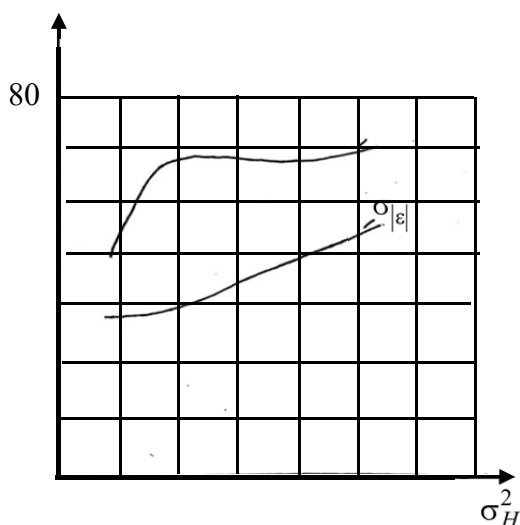


Рис. 1. Зависимость среднего и среднеквадратичного значений отклонения модуля ошибки от дисперсии ошибки определения тангажа и угла рыскания

Fig. 1. Dependence of average and mean square values of a deviation of the error module on the error dispersion of pitch determination and an angle of yaw

Более детальное исследование влияния навигационных углов на точность КЭСН было осуществлено в рамках многофакторного эксперимента с ОСП, который будет описан ниже.

Влияние эволюций ЛА на ошибки привязки ЛА было рассмотрено на примере модели КЭСН с ЦКОС. Скорость полета 400 км/ч, высота 1500 м. Ширина диаграммы направленности принята равной 3° .

На рис. 2 и 3 приведены зависимости ошибок КЭСН вдоль (ϵ_x) и поперек (ϵ_z) траектории полета, а также результирующей ошибки $|\epsilon|$ от углов крена (γ) и рыскания (ψ). Анализ полученных зависимостей показывает достаточно устойчивую тенденцию снижения ошибок КЭСН при уменьшении навигационных углов. Особенно четко эта зависимость прослеживается на графике $|\epsilon| = f(\psi)$.

На рис. 2 и 3 приведены зависимости ошибок КЭСН вдоль (ϵ_x) и поперек (ϵ_z) траектории

полета, а также результирующей ошибки $|\epsilon|$ от углов крена (γ) и рыскания (ψ). Анализ полученных зависимостей показывает достаточно устойчивую тенденцию снижения ошибок КЭСН при уменьшении навигационных углов. Особенно четко эта зависимость прослеживается на графике $|\epsilon| = f(\psi)$.

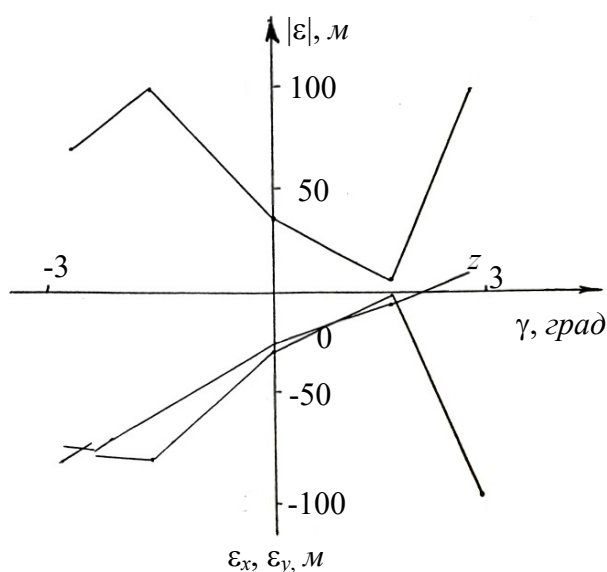


Рис. 2. Зависимость КЭСН от угла крена
Fig. 2. Dependence of KESN on the angle of roll

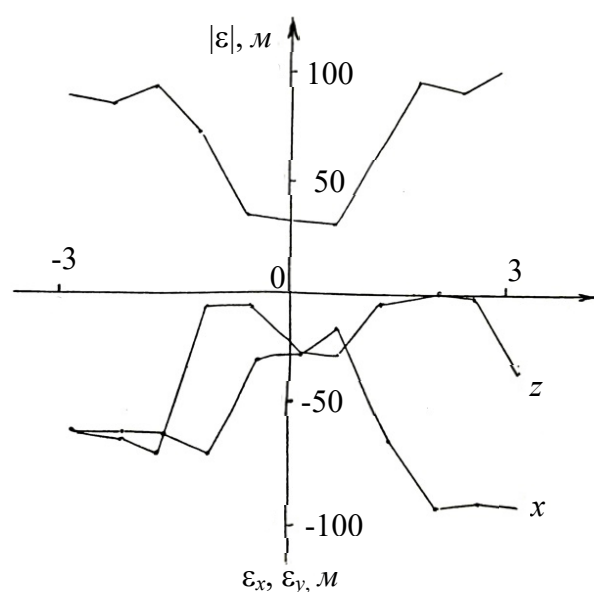


Рис. 3. Зависимость КЭСН от угла рыскания
Fig. 3. Dependence of KESN on the angle of yaw

Здесь уменьшение ψ приводит к меньшему угловому рассогласованию между ориентациями ТИ и ЭИ. Несколько сложнее обстоит дело с влиянием угла крена. Увеличение его в районе малых положительных значений влечет за собой некоторую компенсацию начальной ошибки (при $\psi = 0$), вызванной искажающим влиянием измерительного тракта радиометра. При дальнейшем увеличении γ ошибка заметно растёт.

Оценка влияния угла курса полета ЛА

Эксперименты, выполненные с ОСП, показывают, что полет под тем или иным углом приводит к повороту ТИ относительно эталона, что в свою очередь вызывает увеличение ошибок привязки изображений. Даже небольшие угловые рассогласования ($\sim 2^\circ$) вызывают заметное увеличение модуля ошибки (рис. 4), а при углах $> 6^\circ$ модуль ошибки увеличивается в 4–5 раз. Это свидетельствует о том, что алгоритм поиска максимума, помимо традиционных операций, связанных с плоско-параллельными сдвигами изображений по вертикали и горизонтали при вычислении взаимно корреляционной функции, должен также включать и операции взаимных поворотов этих изображений [8]. В связи с этим нами разработаны и используются при моделировании операции поворота относительно заданной точки ТИ и ЭИ. Следует, правда, заметить, что полученные выводы основаны на анализе ОСП. При использовании ЦКОС влияние рассогласования ТИ и ЭИ не так заметно.

Оценка влияния размасштабирования ТИ и ЭИ

Если высота полета ЛА определена неточно и имеется систематическая ошибка в измерении высоты, то масштабы ТИ и ЭИ оказываются различными. Объясняется этот эффект тем, что из-за фильтрации пространственных частот пятном антенны сигнал T_A на ее выходе «размывается» (рис. 5) и в пространстве и во времени (за счет сканирования).

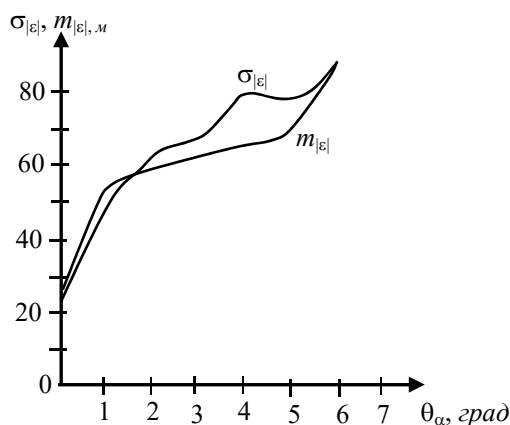


Рис. 4. Зависимость статистических параметров от угла курса ЛА

Fig. 4. Dependence of statistical parameters on an aircraft course angle

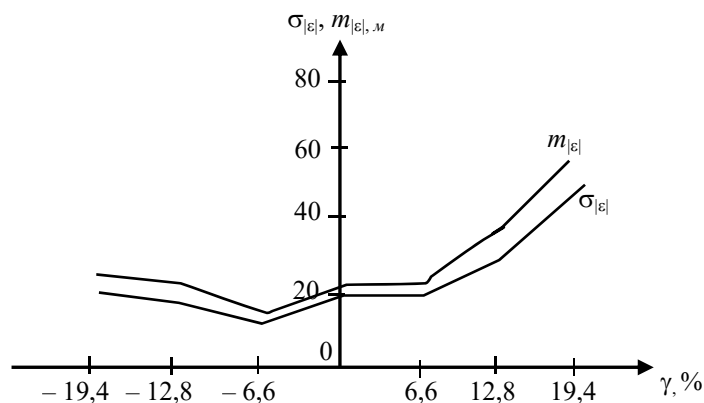


Рис. 5. Зависимость статистических параметров от коэффициента рас-масштабирования

Fig. 5. Dependence of statistical parameters on the unscale coefficient

Поэтому, когда размер (длительность) эталонного сигнала меньше длительности «размытого» сигнала, происходит уменьшение величины функции взаимной корреляции и снижение отношения сигнал/шум, что и вызывает увеличение статистических параметров ошибки. Наоборот, увеличение размера эталона позволяет согласовать его параметры с размером «размытого» текущего сигнала. Возрастает результат накопления, интегрирования при вычислении функции взаимной корреляции, что несколько увеличивает отношение сигнал/шум и снижает

ошибки. Поэтому в реальных КЭС, целесообразно иметь эталон большего масштаба, чем масштаб текущего изображения [9].

Анализ влияния скорости полета ЛА

Увеличение скорости полета приводит к пропорциональному уменьшению длительности сигнала на выходе радиометра, а также к тому, что ухудшаются условия для накопления сигнала на фильтре НЧ. До тех пор, пока

$$\Delta y / V_c > \tau \quad (1)$$

где Δy – размер объекта по вертикали; V_c – скорость полета; τ – постоянная времени фильтра НЧ, фильтр пропускает сигнал практически без искажений. Но если условие (1) не выполняется, то происходит снижение уровня и крутизны сигнала на выходе НЧ, что вызывает появление дополнительных ошибок КЭСН.

В проведенных опытах (многолучевая система, ИСК) при $\tau = 0$ нарушение условия (1) происходит при скоростях около 1000 км/ч и выше. При меньших скоростях наблюдается лишь небольшой рост среднего модуля и среднеквадратичного разброса модуля ошибок.

При использовании в качестве модели подстилающей поверхности ОСП результаты качественно аналогичны тем, что получены в экспериментах с ИСК.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КЭСН

Оценка шума радиометра

Для того, чтобы оценить только влияние флуктуационного шума радиометра на величину ошибок КЭСН, была проведена серия экспериментов, при которых все остальные случайные флуктуации в канале исключались. В частности, были исключены случайные изменения углов крена, тангажа, рыскания, и поэтому во всех опытах траектория движения ЛА была одинаковой.

Результаты экспериментов показали, что влияние шума на дисперсию ошибок оказалось незначительным. И это при том, что моделировался радиометр с весьма низкой чувствительностью $\approx 2^\circ \text{ K/c}$, а среднеквадратическое значение модуля ошибок составило ничтожно малую величину $\approx 0,3 \text{ м}$.

Объяснение этому факту следующее. Спектральная плотность шума радиометра на входе ФНЧ равна $S(\omega_\tau) = \sigma^2 / \Delta f = \sigma^2 \Delta t$, где σ – дисперсия шума на входе ФНЧ, а Δt – интервал дискретизации, используемый при вычислении свертки смеси сигнала и шума с весовой функцией фильтра НЧ.

Дисперсия σ_1^2 шума на выходе ФНЧ будет равна $\sigma_1^2 = S(\omega\tau) / 2\tau = \sigma^2 \Delta t / 2\tau$, где τ – постоянная времени фильтра.

В экспериментах использовались следующие параметры:

$$\Delta t = 0,03 \text{ с}; \quad \tau = 0,1 \text{ с}; \quad \sigma^2 = 400 \text{ К}. \quad \text{Откуда } \sigma_1^2 = 60 \text{ К}.$$

Дисперсия ошибок привязки по соответствующей координате определяется следующим выражением $\sigma_{\downarrow j}^2 \approx -(\sigma_{\downarrow 1}^2) / (2\sigma_{\downarrow 2}^2 N^2 \rho^{\uparrow}(\epsilon_{\downarrow}(j, \alpha)))$, $j = 1, 2, \dots$, где σ_2^2 – дисперсия радиотеплового поля подстилающей поверхности; N^2 – число точек осреднения при вычислении взаимно корреляционной функции между эталоном и текущим изображением; $\rho^{\uparrow}(\epsilon_{\downarrow}(j, \alpha))$ – нормированная сигнальная составляющая взаимно корреляционной функций в точке $\epsilon_{j,\alpha}$ глобального максимума. Хотя аналитическое вычисление σ_j^2 и затруднено из-за сложности опре-

деления $\rho^{\uparrow}(\varepsilon_{\downarrow}(j, \alpha))$, здесь важно другое. Отношение сигнал/шум зависит от числа N^2 . При $N \times N = 1000$ и $\sigma_2^2 = 10$ (поле с малым контрастом) это отношение оказывается весьма большим: $h^2 = 2\sigma_2^2 N^2 / \sigma_1^2 = 30$.

Поэтому и дисперсия ошибок, вызванная исключительным шумом радиометра, даже при полях с относительно малым радиотепловым контрастом является относительно малой.

Анализ влияния ширины диаграммы направленности

Уменьшение габаритов антенны и размера раскрыва антенны приводит к увеличению ширины диаграммы направленности $F(\psi, \varphi)$, что, в свою очередь, приводит к увеличению диаметра пятна антенны на поверхности Земли.

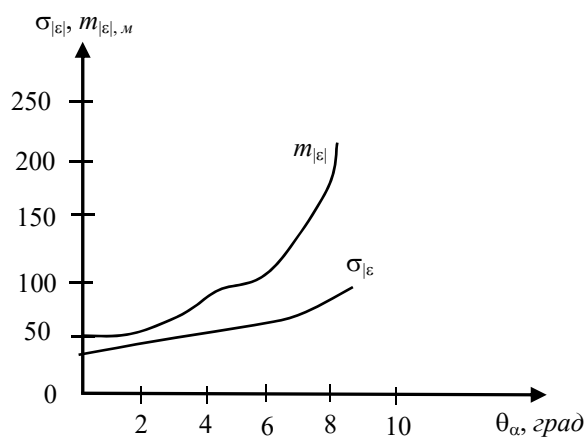


Рис. 6. Зависимости среднего модуля ошибок и среднеквадратического отклонения модуля ошибки от ширины диаграммы

Fig. 6. Dependences of the average error module and the standard deviation of the error module on the diagram width

На рис. 6 показаны зависимости среднего модуля ошибок $m_{|\varepsilon|}$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_{|\varepsilon|}$ модуля ошибки от ширины θ диаграммы (многолучевая система, ИСК). Оба параметра монотонно растут с увеличением θ , хотя и $m_{|\varepsilon|}$ увеличивается быстрее, чем $\sigma_{|\varepsilon|}$.

Одновременный рост параметров объясняется тем, что антенна представляет собой пространственный фильтр низких частот, который сглаживает полезный сигнал тем сильнее, чем больше θ . Из-за такого сглаживания уменьшается энергия полезного сигнала на выходе радиометра, что уменьшает остроту взаимно корреляционной функции и увеличивает ошибки системы [11].

При моделировании КЭСН с использованием ОСП результаты оказываются качественно аналогичными тем, что были получены в экспериментах с ИСК [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье приведены результаты разработки методики оценки ошибок КЭСН, включающей поиск области глобального максимума с точностью дискрета, путем квадратичной интерполяции корреляционной матрицы.

При этом анализ зависимости ошибок КЭСН от параметров, характеризующих условия работы КЭСН (эволюция ЛА, отклонения в курсе полета, степень масштабирования ТИ и ЭИ, скорость полета и т. д.), выявил ряд особенностей в характере этих зависимостей, приводящих к ограничениям на условия работы КЭСН, а именно:

- в то время как для угла рыскания наблюдается устойчивая тенденция снижения ошибок КЭСН при уменьшении отклонений по этому углу, увеличение угла крена в области его малых положительных значений влечет за собой некоторую компенсацию начальной ошибки, вызванной искажающим влиянием измерительного тракта радиометра, при дальнейшем увеличении угла крена ошибка заметно растет;
- увеличение дисперсии параметров, характеризующих эволюции носителя, как и увеличение отклонений в курсе ЛА, приводит к одновременному росту как модуля, так и диспер-

сии ошибок КЭСН; при значительных эволюциях ЛА следует применять либо гиросtabilизированные платформы, либо использовать при нахождении экстремума более общие преобразования, включающие повороты ТИ относительно ЭИ;

- наличие зависимости статистических параметров ошибки не только от величины коэффициента размасштабирования изображений, но и его знака показывает, что в реальных КЭСН целесообразно иметь эталон несколько большего масштаба, чем масштаб ТИ;

- увеличение скорости ЛА способствует появлению дополнительных ошибок КЭСН.

Исследование методами моделирования влияния параметров КЭСН (шумы аппаратуры, ширина сектора обзора, ширина диаграммы направленности) на их точностные характеристики показало:

- влияние флуктуационных шумов радиометра на дисперсию ошибок привязки относительно мало даже в случае полей с относительно небольшим радиотепловым контрастом;

- модель и дисперсия ошибок привязки монотонно растут с увеличением ширины диаграммы направленности;

Анализ особенностей различных типов сканирования показывает:

- большое значение результирующей средней ошибки (по модулю) при коническом сканировании;

- влияние геометрических искажений на среднее значение результирующей ошибки несколько меньше при продольном сканировании (многолучевой радиометр).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование радиотепловой КЭСН с многолучевым радиометром / В.В. Ауров, А.А. Гуревич, Л.П. Деренченко, В.И. Троицкий // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «ОВРЭ». 1992. Вып. 5.

2. Троицкий В.И. Разработка методов математического моделирования радиотепловых КЭСН летательных аппаратов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 5. С. 97–103.

3. Троицкий В.И. Оценка временной навигационной устойчивости радиотепловых полей земной поверхности в задачах корреляционно-экстремальной навигации // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 2. С. 72–75.

4. Троицкий В.И. Критерии информативности эталонных радиотепловых полей, используемых в КЭСН // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 3. С. 61–64.

5. Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.

6. Богородский В.В., Козлов А.И. Микроволновая радиометрия земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 260 с.

7. Поляриметрические алгоритмы обнаружения радиолокационных объектов на фоне активных шумовых помех / А.И. Козлов, Э.В. Амнинов, Ю.И. Вареница, В.Л. Румянцев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 12–1. С. 179–187.

8. Поляризационно-доплеровская функция отклика составного радиолокационного объекта в задаче обнаружения / А.И. Козлов, В.Н. Татарин, С.В. Татарин, Н.Н. Кривин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 193. С. 26–28.

9. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Численный метод решения трехмерной обратной задачи рассеяния электромагнитных волн на препятствии // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 179. С. 135–139.

10. Быков А.А., Сидоркина Ю.А., Ковальчук А.А. Применение сигма-дельта модуляторов в дробных синтезаторах частоты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2011. № 2.

11. Шахтарин Б.И., Быков А.А. Сигма дельта модулятор // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 158. С. 156–161.

12. Акиншин Н.С., Румянцев В.Л., Акиншин О.Н. Экспериментальная оценка информативности поляризованно-модулированных сигналов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2017. Т. 22, № 5. С. 478–486.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Троицкий Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Московского государственного университета геодезии и картографии, v.troja@yandex.ru.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE MAIN PARAMETERS AND CONDITION OF WORK OF AIRCRAFT CESN ON THE EFFICIENCY OF THEIR USE METHODS OF MATHEMATICAL MODELING

Vladimir I. Troitsky¹

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

ABSTRACT

The article describes the results of the numerical experiments on the mathematical model of the correlation-extreme navigation system (CESN) of the aircraft (LA) using microwave radiation of the earth's cover. The aim of the numerical experiments was the analysis of the influence of the main parameters (characteristics of the radiometer and antenna, a means of reviewing the space, parameters of the current image and the reference image, methods for image processing (algorithms for image correlation), conditions of the equipment operation (the speed and altitude of aircraft, the evolution of media) on the efficiency of CESN. The experiments were carried out with the fields of the underlying surface of three types—with an artificially synthesized map (CLAIM) containing several objects of different thermal contrast; with a homogeneous random field (OSP), with fragments of a digital map object structure (TSKOS) of real surface area of the earth. As a result of numerical experiments the author studied the influence on exactness characteristics of CESN navigation parameters (bank angles, pitch, yaw), flight altitude and speed, the noise of the radiometer, the pattern width, the width of the review sector, mis-scaling and angular misalignment of the current and reference images. Comparison of different methods of surface scanning was made based on the simulation results. During the experiments, the variation of one of the parameters with respect to the base variants of the parameters was carried out and the values and variances of errors of the CESN were estimated. All three main methods of beam scanning (longitudinal with a multi-beam radiometer, conical and transverse) were considered. The operation of the maximum search was made up of two procedures: searching for the global maximum area of the correlation matrix by enumerating all matrix entries and refining the location of the true maximum point by quadratic interpolation of the function. The implementation of errors is considered for various trajectories of the aircraft's motion, as well as for various angular variances. The implementation processing showed that an increase in the angular dispersion leads to a simultaneous increase in both the error modulus and the variance of the error modulus. The analysis of the obtained dependences shows a fairly stable tendency to reduce errors of CESN with a decrease in navigation angles. This dependence is demonstrated graphically. In order to estimate only the influence of the fluctuation noise of the radiometer on the magnitude of the CESN errors, a series of experiments was performed in which all other random fluctuations in the channel were eliminated.

Key words: navigation, simulation, microwave radiation, informativeness of the earth's cover radiation.

REFERENCES

1. Aurov V.V., Gurevich A.A., Derenchenko L.P., Troitsky V.I. *Modelirovanie radioteplovoy KESN s mnogoluchevym radiometrom* [Modeling of the radiothermal CESN with a multibeam radiometer]. *Voprosy radioelektroniki Ser. OVRE* [Questions of radioelectronics. Series of OVRE], 1992, vol. 5. (in Russian)
2. Troitsky V.I. *Razrabotka metodov matematicheskogo modelirovaniya radioteplovykh KESN letatelnykh apparatov* [Development of methods for mathematical modeling of radiothermal CESN air-

craft]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2016, vol. 19, No. 5, pp. 97–103. (in Russian)

3. Troitsky V.I. *Ocenka vremennoj navigacionnoj ustojchivosti radioteplovykh polej zemnoj poverxnosti v zadachax korrelyacionno-ekstremalnoj navigacii* [Evaluation of the temporal navigation stability of the radio thermal fields of the earth's surface in problems of correlation-extreme navigation]. *Izvestiya vuzov "Geodeziya i kartografiya"* [Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotography], 2013, No. 2, pp. 72–75. (in Russian)

4. Troitsky V.I. *Kriterii informativnosti etalonnykh radioteplovykh polej, ispolzuemykh v KESN* [Criteria for informative reference radiothermal fields used in CESN]. *Izvestiya vuzov "Geodeziya i kartografiya"* [Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotography], 2013, No. 3, pp. 61–64. (in Russian)

5. Bogorodsky V.V., Kanareikin D.B., Kozlov A.I. *Polyarizatsiya rasseyannogo i sobstvennogo radioizlucheniya zemnykh pokrov* [Polarization of scattered and intrinsic radio emission of terrestrial coverings]. L.: Gidrometeoizdat, 1981, 280 p. (in Russian)

6. Bogorodsky V.V., Kozlov A.I. *Mikrovolnovaya radiometriya zemnykh pokrovov* [Microwave radiometry of terrestrial coverings]. L.: Gidrometeoizdat, 1985, 260 p. (in Russian)

7. Kozlov A.I., Amninov E.V., Varenica Yu.I., Rumyantsev V.L. *Polyarimetricheskiye algoritmy obnaruzheniya radiolokatsionnykh ob"yektov na fone aktivnykh shumovykh pomekh* [Polarimetric algorithms for detecting radar objects against the background of active noise interference]. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Izvestia of the Tula State University. Engineering Sciences], 2016, No. 12–1, pp. 179–187. (in Russian)

8. Kozlov A.I., Tatarinov V.N., Tatarinov S.V., Krivin N.N. *Polyarizatsionno-dopplerovskaya funktsiya otklika sostavnogo radiolokatsionnogo ob"yekta v zadache obnaruzheniya* [Polarization-Doppler response function of a composite radar object in the detection problem]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2013, No. 193, pp. 26–28. (in Russian)

9. Kozlov A.I., Maslov V.Yu. *Chislennyi metod resheniya trokhmernoy obratnoy zadachi rasseyaniya elektromagnitnykh voln na prepyatstvii* [A numerical method for solving the three-dimensional inverse scattering problem of electromagnetic waves on an obstacle]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2012, No. 179, pp. 135–139. (in Russian)

10. Byikov A.A., Sidorkina Yu.A., Kovalchuk A.A. *Primenenie sigma-delta modulyatorov v drobnnykh sintezatorah chastoty* [The use of sigma-delta modulators in fractional frequency synthesizers]. *Vestnik MGTU im. Baumana Seriya "Estestvenniye nauki"* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrument construction"], 2011, No. 2. (in Russian)

11. Shakhtarin B.I., Byikov A.A. *Sigma-delta modulyator* [Sigma-delta modulator]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2010, No. 158, pp. 156–161. (in Russian)

12. Akinshin N.S., Rumyantsev V.L., Akinshin O.N. *Eksperimentalnaya ocenka informativnosti polyarizacionno-modulirovannykh signalov* [Experimental evaluation of the information content of polarization parameters]. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Proceedings of Universities, Electronics], 2017, vol. 22, No. 5, pp. 478–486. (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Vladimir I. Troitsky, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Chair of Physics, Moscow State University of Geodesy and Cartography, v.troja@yandex.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

17.10.2017
14.03.2018

Received
Accepted for publication

17.10.2017
14.03.2018