

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ В НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2021 г. А. И. Козлов^а, В. П. Савиных^б, В. И. Троицкий^{б,с,*}

^аМосковский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

^бМосковский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

^сФинансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Россия

*E-mail: v.troja@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.10.2020 г.

Для решения задач корреляционно-экстремальной навигации по микроволновому излучению предложены модели излучения земных покровов (параметрические модели излучения), в которых модельные расчеты производятся с привлечением ограниченного количества доступных априорных факторов, поддающихся описанию (открытые водные объекты, открытые грунты, искусственные покрытия и др.), и комбинируются со статистическими параметрами радиационных характеристик земных покровов, определяемых по результатам экспериментов с учетом их состояния, а влияние атмосферы учитывается на основе концепции эффективной температуры ее излучения путем введения аддитивной добавки к собственному излучению покровов.

Ключевые слова: автономная навигация, синтез эталонных изображений, моделирование, микроволновое излучение, земные покровы

DOI: 10.31857/S0205961421030052

ВВЕДЕНИЕ

Проблема автономной навигации летательных аппаратов по радиотепловому излучению в СВЧ диапазоне (микроволновому излучению) остается актуальной до настоящего времени (Антюфеев и др., 2014; Щербинин, 2011). Основные трудности при этом определяются возможностью создания опорных (эталонных) изображений и обеспечения их достаточной информативности. При решении этой задачи целесообразно использование методов синтеза эталонных изображений (ЭИ), которые предполагают заполнение основы таких изображений, которая формируется с использованием топографических либо специальных карт, дешифрованных материалов аэрокосмической съемки, данными об информативных признаках радиотеплового излучения (Богородский и др., 1981; Выставкин и др., 1989; Логвин, Троицкий, 1995; Старых и др., 2012). Подобное осуществляется с использованием специальных методов синтеза изображений на основе моделей полей излучением на входе аппаратуры дистанционного зондирования аэрокосмических систем наблюдения (Бондур, Савин, 1995; Бондур, 2000а, б; Бондур и др., 2003).

Синтез опорных изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах (КЭСН) летательных аппаратов (ЛА) с использо-

ванием микроволнового излучения земных покровов предполагает использование топографических карт для коррекции участков траектории полета, выделение однородных элементов объектового состава и наполнение их информативными для заданного диапазона длин волн характеристиками излучения. При этом необходимо учитывать, что характеристики микроволнового излучения земной поверхности зависят от многих факторов, учет которых является чрезвычайно сложной задачей (Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б; Бондур и др., 2019).

Проведенные оценки навигационных свойств экспериментально полученных тепловых полей позволили выявить закономерности, существенные при синтезе опорных изображений земной поверхности, такие как возможность объединения различных типов объектов в группы до 4–6 объектов без существенного ущерба навигационным характеристикам соответствующего эталонного радиотеплового поля, а также возможность расширения понятия “тип объекта” на этапе интерпретации аэрокосмических изображений, когда тип объекта представляет собой совокупность ограниченного числа четко различающихся на топографических и тематических картах объектов (Троицкий, 1997, 2013а, 2014а, б).

Использование для этих целей моделей излучения различных типов земных покровов требует

привлечения большого объема разнообразной априорной информации (Бондур, 2000а; Бондур, Савин, 1995), которая получается, в том числе, путем обработки больших потоков данных дистанционного зондирования (Бондур, 2010, 2014; Бондур, Старченков, 2001), что в рассматриваемых приложениях практически нереально.

Другой путь — непосредственное использование для заполнения основы ЭИ баз экспериментальных данных, также достаточно проблематичен по следующим причинам:

- составление полных каталогов, отвечающих самым различным параметрам земных покровов и атмосферы представляет собой сложную и трудоемкую задачу;
- в подобных каталогах невозможно предусмотреть все многообразие встречающихся земных покровов.

В настоящей работе для решения задач корреляционно-экстремальной навигации предложено использовать такие модели излучения земных покровов, в которых модельные расчеты для поддающихся описанию с привлечением ограниченного количества доступных априорных факторов (открытые водные объекты, открытые грунты, искусственные покрытия и др.) комбинируются со статистическими параметрами радиационных характеристик покровов, определяемых по результатам экспериментов с учетом их состояния, а влияние атмосферы учитывается на основе концепции эффективной температуры излучения атмосферы путем введения аддитивной добавки к собственному излучению покровов.

АНАЛИЗ НАВИГАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РАДИОТЕПЛОвого ПОЛЯ

Изучение навигационных свойств экспериментально полученных радиотепловых полей позволило выявить две закономерности, существенные при синтезе ЭИ участков земной поверхности, а именно:

- возможность объединения объектов различных типов в группы (до 4–6) без существенного ущерба для навигационных характеристик соответствующего эталонного радиотеплового поля;
- возможность расширения понятия “тип объекта” на этапе дешифрирования космических и аэрофотоснимков, когда фактически под типом объекта понимается совокупность ограниченного количества различающихся на топографических и тематических картах объектов.

Остановимся на этом вопросе подробнее. Проведенное нами большое количество как летных, так и численных (на модели радиотепловой КЭСН) экспериментов по изучению характеристик микроволнового излучения, выполнявшихся по ряду предварительно отобранных, исходя из

обеспечения различной информативности и возможности привязки к наземным ориентирам трасс районов экспериментов в различных сезонных (весна—осень и осень, зима, весна) и погодных условиях (Троицкий, 2013а, 2018а), было проанализировано следующим образом. Все многообразие земных покровов было разбито более чем на 30 групп, среди которых можно упомянуть такие как поле, река, огороды деревни, постройки деревни, луг на окраине деревни, прибрежный луг, озеро, асфальтобетонная дорога, гравийная дорога с кюветами и откосами насыпи, поросшими травой, просека с высоковольтной линией, изреженная сосново-березовая посадка, осиново-березовый лес, ольховый лес, балка луговая, поросшая по краям деревьями и кустарником, и т.д. В другой серии экспериментов рассматривались трассы хвойно-лиственной лесостепи. В экспериментах по трассам в зимних условиях полагалось, что снежный покров имел толщину порядка 30–40 см.

По результатам экспериментов объекты различных типов объединялись в одну группу, исходя из степени близости средних значений радиояростной температуры в пределах одного объекта. Для каждого маршрута число градаций температуры земных покровов доводилось до определенного минимума, когда дальнейшее уменьшение их числа приводило к заметному изменению значения радиуса корреляции реального и модельного профилей эффективных температур, а также уменьшению их коэффициента корреляции и отношения сигнал/шум.

Анализ навигационных свойств упомянутых экспериментальных профилей радиотеплового поля (РТП) при максимально возможном числе дешифрируемых объектов вдоль трасс полета и навигационных свойств при объединении объектов с близкими значениями радиояростных температур в одну группу показывает, что навигационные свойства РТП при таком объединении практически не претерпевают изменений при уменьшении числа типов объектов до 4–6.

На основе полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1. РТП ландшафтных зон с развитой гидрографической сетью обладают потенциально высокой информативностью. На участках коррекции, где достаточно велик удельный вес открытых водоемов, можно ограничиться бинарными изображениями (суша—вода), что значительно упрощает задачу синтеза.

2. При большом числе элементов земной поверхности — элементов объектового состава (ОС) — в районе коррекции возможно значительное сокращение числа градаций эффективной температуры без существенного снижения точности навигационной привязки. В этом случае до-

статочны ограничиться 4–6 градациями и даже менее, если общее число классов объектов участка коррекции невелико.

Минимальное необходимое число градаций для конкретной трассы целесообразно устанавливать, исходя из следующих сведений:

- 1) требуемой точности и надежности навигационной привязки;
- 2) объектового состава и его структуры в предполагаемом районе коррекции;
- 3) сезонных изменений и метеоусловий;
- 4) наличия априорной информации о толщине снежного покрова, влажности.

Приведенные соображения позволяют упростить процедуру синтеза ЭИ, поскольку обычно изначально выделяется меньшее число типов элементов ОС в связи с недостаточным объемом априорной информации.

С учетом перечисленных особенностей радиотепловых полей предлагается подход к формированию моделей излучения (параметрических моделей излучения), в котором модельные расчеты для поддающихся описанию с привлечением ограниченного количества доступных априорных факторов таких земных покровов, как открытые водоемы, открытые почвогрунты, искусственные покрытия и др., сочетаются с определенными из экспериментов статистическими параметрами характеристик излучения различных покровов с учетом их состояния. При этом осуществляется учет влияния атмосферы на основе использования понятия эффективная температура излучения атмосферы, путем введения аддитивной добавки ΔT_a (приращения, обусловленного радиотепловым излучением атмосферы, отраженным от земной поверхности) к собственному излучению земных покровов по формуле $\Delta T_a = \Delta T_{a_{эф}} (1 - \alpha)$. Модельные расчеты при этом основываются на формулах Френеля с поправкой на влияние неровностей поверхности объектов (Троицкий, 2018б).

Объекты земной поверхности описываются, как правило, очень широким спектром неровностей – от мелкомасштабных до крупномасштабных. Строгий учет одновременного влияния всего многообразия неровностей невозможен как в теоретическом плане, так и в плане получения достаточно подробной информации для их описания. Ослабить влияние неровностей можно выбором оптимальных условий измерения, например, осуществляя зондирования земной поверхности в нади́р на круговой поляризации (Троицкий, 2018б), либо под малыми углами наблюдения. Это позволяет избавиться от влияния изотропных и в значительной степени от анизотропных крупномасштабных неровностей. При этом остается предусмотреть приращение излучательной спо-

собности за счет мелкомасштабных неровностей ($\Delta \alpha$), которые относительно невелики. Так, на длинах волн в районе 0.8 см величина $\Delta \alpha$, согласно (Троицкий, 2018а), составляет в среднем:

- для почвогрунтов – 0.015;
- для взволнованной водной поверхности – 0.01.

Статистические данные о контрастообразующих факторах радиотеплового излучения с учетом сезона и метеоусловий могут быть получены в результате экспериментальных исследований как в данном районе, так и в районе со сходными ландшафтно-климатическими условиями (районе-аналоге). Полученные экспериментальные данные дают необходимый исходный материал для построения параметрических моделей основных типов земных покровов (Троицкий, 2013а, 2018а, 2018б).

Понятно, что подобных семейств моделей (в зависимости от рассматриваемых трасс полета и используемых критериев отбора) может быть очень много. Поскольку нас, в конечном счете, интересуют навигационные свойства радиотепловых полей, то и к соответствующим параметрическим моделям предъявляются определенные требования, основными из которых являются:

- обеспечение требуемых навигационных характеристик КЭСН, использующих в качестве эталонных синтезированные радиотепловые поля;
- полнота учета доступной априорной информации;
- обеспечение временной (сезонной, суточной) стабильности навигационных характеристик синтезируемых радиотепловых полей;
- независимость навигационных характеристик синтезированных радиотепловых полей от конкретной аппаратурной реализации КЭСН.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

На основе обобщения результатов наших работ, а также опубликованных экспериментальных данных других авторов предлагаются следующие параметрические модели.

Для периода активной вегетации растительности (для средней полосы России, например, этот период с мая по сентябрь включительно) этим требованиям удовлетворяют семейства моделей таких объектов:

1. Хвойный лес

$$\overline{T}_\Lambda = 0.993T + 0.007T_a(0) \sec(50^\circ) - \Delta T,$$

где ΔT – поправка на случай, если растительность смочена водой в результате осадков или обильной росы ($\Delta T \approx 10$ К).

2. Смешанный лес, хорошо развитые и густые травянистые покровы или сельскохозяйственные колосовые, или мелколиственные культуры (высота растительности более 1 м)

$$\bar{T}_2 = 0.981T + 0.019T_a(0)\sec(50^\circ) - \Delta T.$$

3. Лиственный лес, заросли кустов, сады, редколесье с развитым подлеском

$$\bar{T}_3 = 0.964T + 0.036T_a(0)\sec(50^\circ) - \Delta T.$$

4. Заболоченные объекты 1, 2, 3 с подтоплением водой, сплошные тростниково-камышовые заросли на болоте

$$\bar{T}_4 = 0.94T + 0.06T_a(0)\sec(50^\circ) - \Delta T.$$

5. Полупрозрачные растительные покровы (луга, пастбища, сельскохозяйственные культуры, покосы, заросшая травой стерня, огороды и т.д.)

$$\bar{T}_5 = \bar{T}_6 + \bar{T}_2 - \bar{T}_6/2 - \Delta T.$$

6. Открытые или почти открытые участки почвы (пашня, стерня со слабой растительностью, поле со всходами сельскохозяйственных культур, огороды, практически лишенные растительности, пустыни и полупустыни и т.д.)

$$\bar{T}_6 = \alpha_c T + (1 - \alpha_c) T_a(0)\sec(20^\circ).$$

7. Небольшой населенный пункт сельского типа с неогнестойкими строениями и приусадебными участками T_7 . Расчет \bar{T}_7 для этого объекта предлагается осуществлять в двух вариантах:

– для первого варианта \bar{T}_7 определяется путем усреднения соответствующих экспериментальных данных вдоль всей трассы;

– для второго варианта:

$$T_1 = \begin{cases} \alpha_c T + 0.032 \left(1 - \frac{l_{CH}}{25}\right) + T_a(0)(1 - (\alpha_c + 0.032)) \left(1 - \frac{l_{CH}}{25}\right) \sec 30^\circ & \text{при } l_H \leq 25 \text{ см;} \\ \alpha_c T + T_a(0)(1 - \alpha_c) \sec 30^\circ & \text{при } l_{CH} > 25 \text{ см,} \end{cases}$$

где l_{CH} – толщина снежного покрова в сантиметрах;

2. Лиственный лес

$$\bar{T}_2 = (\alpha_c + 0.018)T + (1 - \alpha_c - 0.018)T_a \sec 45^\circ;$$

3. Огороды с отдельными деревьями и кустарниками

$$\bar{T}_3 = (\alpha_c + 0.005)T + (1 - \alpha_c - 0.005)T_a(0)\sec 35^\circ;$$

4. Луг

$$\bar{T}_4 = (\alpha_c + 0.03)T + (1 - \alpha_c - 0.003)T_a(0)\sec 40^\circ;$$

5. Заросли кустов, редколесье

$$\bar{T}_7 = 0.875T + 0.125T_a(0)\sec(50^\circ).$$

8. Болота и заболоченности.

– первый вариант расчета для этого объекта аналогичен первому варианту объекта по п. 7;

– при втором варианте расчета

$$\bar{T}_8 = (T - \bar{T}_9)0.75 + T_9 - \Delta T.$$

9. Открытые водоемы

$$\bar{T}_9 = \alpha_9 T_b + (1 - \alpha_9) T_a(0),$$

где T_b – температура поверхности воды (в градусах Кельвина).

Для зимнего периода времени диапазон радиояркостных контрастов меньше, чем для периода активной вегетации растительности (Бондур, 2010). Вследствие этого для “зимних” моделей существенно выполнение еще одного требования – сохранения знака контраста радиояркостных температур смежных объектов. Как показывают результаты расчетов, для зимних экспериментальных данных число ошибок в оценке знака контраста не должно превышать 10–20% общего числа контрастов. При невыполнении этого условия качество навигационного поля заметно ухудшается (резко возрастает отношение сигнал/шум).

Если о районе коррекции известно, что за время, прошедшее с момента образования устойчивого снежного покрова, не было оттепелей с температурой выше $+2^\circ\text{C}$, то величину α_c можно принимать равной $\alpha_c = 0.896$ для $\lambda = 0.8$ см и $\alpha_c = 0.912$ для $\lambda = 2.25$ см. Соответственно, для выбранных групп объектов для $\lambda = 0.8$ см имеем:

1. Лед на поверхности воды, покрытой снегом

$$\bar{T}_5 = (\bar{T}_2 - 0.026)T + T_a(0)\left(1.026 - \frac{\bar{T}_2}{T}\right)\sec 35^\circ;$$

6. Поле

$$\bar{T}_6 = (\bar{T}_4 - 0.011)T + T_a(0)\left(1.011 - \frac{\bar{T}_4}{T}\right)\sec 25^\circ;$$

7. Населенный пункт с неогнестойкими строениями, приусадебными участками

$$\bar{T}_7 = (\alpha_c + 0.02)T + T_a(0)(1.016 - \alpha_c)\sec 40^\circ;$$

8. Болото

$$\bar{T}_8 = (\bar{\alpha}_c + 0.015)T + T_a(0)(1.013 - \bar{\alpha}_c)\sec 30^\circ;$$

9. Заболоченные участки

$$\bar{T}_9 = (\bar{T}_8 - 0.03T) + T_a(0)\left(1.03 - \frac{\bar{T}_8}{T}\right)\sec 30^\circ.$$

Предложенное семейство моделей для периода устойчивого снежного покрова было апробировано на данных, полученных в ходе проведения многочисленных экспериментальных исследований (Троицкий, 1997, 2013а, б, 2014а, б; 2018а, б).

Исследование влияния толщины снежного покрова и плотности снега на отношение сигнал/шум реального и модельного профилей (подобно тому, как исследование влияние влажности почвогрунтов для периода активной вегетации растительности) показывает, что при значениях плотности снега более 0.2 г/см^3 значение этого отношения практически не меняется. Более критичным является значение толщины снежного покрова и, таким образом, этот параметр должен присутствовать в априорной информации о предлагаемом маршруте.

Предложенные выше два семейства моделей охватывают в зависимости от конкретного региона на период 10–11 мес. В период межсезонья, к которому относится таяние снегов и образование устойчивого снежного покрова, применение этих моделей следует корректировать дополнительной априорной информацией. На трассах конкретных полетов, когда участки коррекции могут планироваться заранее, количество контрастных покровов может быть ограничено, а в условиях объединения ряда земных покровов в группы число используемых моделей для участков коррекции траектории может становиться еще меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены параметрические модели микроволнового излучения для использования при создании эталонных изображений различных объектов в интересах обеспечения автономной навигации летательных аппаратов по радиотепловому излучению в СВЧ диапазоне. В этих моделях расчеты для поддающихся описанию радиационных характеристик различных объектов (открытые водные объекты, открытые грунты, искусственные покрытия и др.) с привлечением ограниченного количества доступных априорных факторов комбинируются со статистическими параметрами радиотеплового излучения земных покровов с учетом их состояния, определяемыми по результатам экспериментов, а влияние атмосферы учитывается на основе концепции эффективной температуры излучения атмосферы путем введения аддитивной добавки к собственному излучению объектов земной поверхности. Предложенные модели достаточно полно описывают микро-

волновое излучение разнообразных земных покровов в различные сезонные периоды.

С использованием таких параметрических моделей микроволнового излучения различных объектов земной поверхности предложен подход к решению задач корреляционно-экстремальной навигации летательных аппаратов по радиотепловому излучению в СВЧ диапазоне спектра электромагнитных волн.

Предложенные параметрические модели микроволнового излучения были использованы авторами для создания эталонных изображений при проведении летных экспериментов с радиометрическими датчиками подобных систем, подтвердивших эффективность их использования (Троицкий, 1997).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антофеев В.И., Быков В.Н., Гричанюк А.М., Иванченко Д.Д., Колчигин Н.Н., Краюшкин В.А., Сотников А.М.* Матричные радиометрические корреляционно-экстремальные системы навигации летательных аппаратов. Харьков: Харьковский национальный университет им. В.Н. Карамзина, 2014. 372 с.
- Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И.* Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 279 с.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2000а. № 5. С. 16–27.
- Бондур В.Г.* Моделирование двумерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры методом фазового спектра // Исслед. Земли из космоса. 2000б. № 5. С. 28–44.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
- Бондур В.Г., Аржененко Н.И., Линник В.Н., Титова И.Л.* Моделирование многоспектральных аэрокосмических изображений динамических полей яркости // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 2. С. 3–17.
- Бондур В.Г., Савин А.И.* Принципы моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 24–33.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н.* Оценка пространственной анизотропии неоднородностей лесной растительности при различных азимутальных углах радарного поляриметрического

зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 92–103.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008а. № 5. С. 9–14.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008б. № 6. С. 64–73.

Выставкин А.Н., Кутуза Б.Г., Обухов Ю.В., Смирнов М.Т., Терентьев Е.В. Синтез изображений геофизических полей по трассовым СВЧ радиометрическим спутниковым изображениям // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 4. С. 91–98.

Логвин А.И., Троицкий В.И. Синтез радиолокационных изображений местности по топографическим картам и материалам аэрокосмической съемки // В сб. "Совершенствование радиолокационных систем гражданской авиации и процессов их технической эксплуатации. М.: МИИГА, 1995. С. 36–40.

Старых А.В., Козлов А.И., Жилинская Г.А., Штраков А.Ю. Экспериментальная иллюстрация возможностей микроволновой радиометрии для навигации воздушных судов по наземным ориентирам // Научный вестник Московского Государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 176. С. 74–77.

Троицкий В.И. Летно-экспериментальные исследования радиометрических датчиков корреляционно-экстремальных систем навигации летательных аппаратов // Международный сборник трудов авиационных вузов "Авиационная радиоэлектроника". Москва, 1997. С. 48–53.

Троицкий В.И. Критерии информативности эталонных радиотепловых полей, используемых в корреляцион-

но-экстремальных системах навигации // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 3. С. 61–64.

Троицкий В.И. Векторное представление радиотепловых полей в задаче корреляционно-экстремальной навигации летательных аппаратов по собственному излучению земных покровов // Научный вестник Московского Государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 210. С. 37–39.

Троицкий В.И. Информативность векторных радиотепловых полей в задаче корреляционно-экстремальной навигации летательных аппаратов // Научный вестник Московского Государственного технического университета гражданской авиации. 2014. № 210. С. 33–36.

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

Троицкий В.И. Анализ влияния основных параметров и условий функционирования КЭСН летательных аппаратов по микроволновому излучению земной поверхности на эффективность их использования // Научный вестник Московского Государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21. № 2. 2018. С. 171–180.

Троицкий В.И. Исследование влияния характеристик Земли и атмосферы на точностные характеристики радиотепловых корреляционно-экстремальных систем навигации методом математического моделирования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 4. С. 442–452.

Щербинин В.В. Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения летательных аппаратов. Москва: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 230 с.

Parametric Models of Microwave Radiation of the Earth's Covers in Aircraft Navigation

A. I. Kozlov¹, V. P. Savinykh², and V. I. Troitsky^{2,3}

¹Moscow state University of civil aviation, Moscow, Russia

²State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

³Financial University under the government of the Russian Federation, Moscow, Russia

To solve the tasks of the correlation extreme navigation using microwave radiation, we suggest the models of land cover radiation (parametric models of radiation) where model simulations carried out involving a limited number of available a priori factors (surface water bodies, open soils, paved surfaces, etc.) are combined with statistical parameters of the radiation characteristics of various types of land cover determined from experiments taking into account their state, and the influence of the atmosphere is taken into account on the basis of the concept of the effective temperature of the atmosphere radiation by introducing an additive to the own radiation of the covers.

Keywords: autonomous navigation, synthesis of reference images, modeling, microwave radiation, land cover

REFERENCES

Antyufeev V.I., Bykov V.N., Grichanyuk A.M., Ivanchenko D.D., Kolchigin N.N., Krayushkin V.A., Sotnikov A.M. Matrix radiometric correlation-extreme navigation systems of aircraft. Kharkiv: Kharkiv national University, named after V.N. Karamzin, 2014. 372 p. (In Russian).

Bogorodsky V.V., Kanareykin D.B., Kozlov A.I. Polarization of scattered and intrinsic radio radiation of the earth's surface. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981. 279 p. (In Russian.)

Bondur V.G. Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // Izv., Atmos.

- Oceanic Phys. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039
- Bondur V.G.* Metody modelirovaniya poley izlucheniya na vkhode aerokosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya [The Methods of the Emission Model Field Which Be Formed on Enter of Airspace Remote Sensing System] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*. 2000a. № 5. P. 16–27 (In Russian).
- Bondur V.G.* Modelirovanie dvumernykh sluchaynykh poley yarkosti na vkhode aerokosmicheskoy apparatury metodom fazovogo spektra [Phase-Spectral Method's Modeling of Two-Dimension Stochastic Brightness Field Formed at the Airspace Apparatus Entrance] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*. 2000b. № 5. P. 28–44 (In Russian).
- Bondur V.G.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060
- Bondur V.G., Arzhenenko N.I., Linnik V.N., Titova I.L.* Modelirovanie mnogospektralnykh aerokosmicheskikh izobrazheniy dinamicheskikh poley yarkosti [The Simulation of Multispectral Air-Space Images of Dynamic Brightness Fields] // *Issledovanie Zemli is Kosmosa*. 2003. № 2. P. 3–17.
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N.* Spatial anisotropy assessment of the forest vegetation heterogeneity at different azimuth angles of radar polarimetric sensing // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2019. V. 55. № 9. P. 926–934. DOI: 10.1134/S0001433819090093
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008a. Iss. 5. P. 9–14 (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Distantsionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi metodami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008b. Iss. 6. P. 64–73 (In Russian).
- Bondur V.G., Savin A.I.* Modelling of signals on input to remote sensing equipment of aerospace environment monitoring systems // *Earth Obs. Rem. Sens.* 1996. V. 13. P. 539–553.
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2001. № 3. P. 118–143.
- Logvin A.I., Troitsky V.I.* Synthesis of radar images of the area based on topographic maps and aerospace survey material // In the collection “Improvement of civil aviation radar systems and their technical operation processes”. Moscow: MIGA, 1995. P. 36–40 (In Russian).
- Shcherbinin V.V.* Construction of invariant correlation-extreme systems and guidance of aircraft. Moscow: Publishing house of Bauman Moscow state University, 2011. 230 p. (In Russian).
- Starykh A.V., Kozlov A.I., Zhilinskaya G.A., Shatrakov A.Y.* Experimental illustration of the capabilities of microwave radiometry for navigation of aircraft on ground arietinum // *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 2012. № 176. P. 74–77 (In Russian).
- Troitsky V.I.* Flight experimental studies of radiometric sensors correlation-extreme navigation systems of aircraft // *International collection of works of aviation universities. Aviation Radioelectronics*. M., 1997. P. 48–53 (In Russian).
- Troitsky V.I.* The criteria of informativeness of the reference radio thermal fields used in the correlation – extreme navigation systems // *Izvestia vuzov Geodesy and aerophot surveying*. 2013. № 3. P. 61–64 (In Russian).
- Troitsky V.I.* Vector representation of radiothermal fields in the problem of correlation-extreme navigation of aircraft on their own radiation of the earth's covers // *Civil Aviation High Technologies*. 2014. № 210. P. 37–39 (In Russian.)
- Troitsky V.I.* Information content of vector radiothermal fields in the problem of correlation-extreme navigation of aircraft // *Civil Aviation High Technologies*. 2014. № 210. P. 33–36 (In Russian).
- Troitsky V.I.* Estimation of temporal navigation stability of radiothermal fields used in correlation-extreme navigation systems // *Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotourveying*. 2013. № 2. P. 72–75 (In Russian).
- Troitsky V.I.* Analysis of the influence of the main parameters and operating conditions of correlation-extreme navigation systems of aircraft on the efficiency of their use. *Civil Aviation High Technologies*. 2018. V. 21. № 2. P. 171–180 (In Russian).
- Troitsky V.I.* On studying the influence of the characteristics of the Earth and atmosphere on the accuracy parameters of correlation-extreme navigation system of the aircraft via the method of mathematical simulation // *Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*. 2018. V. 62(4). P. 442–452 (In Russian).
- Vystavkin A.N., Kutuzov B.G., Obukhov Yu.V., Smirnov M.T., Terentyev E.V.* Synthesis of images of geophysical fields by trace microwave radiometric satellite images // *Earth exploration from space*. 1989. № 4. P. 91–98 (In Russian).