

УДК 621.396

## ИНФОРМАТИВНОСТЬ ВЕКТОРНЫХ РАДИОТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.И. ТРОИЦКИЙ

Различные информативные характеристики радиотеплового поля, необходимые для создания эталонных изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации, рассматриваются как компоненты векторного поля. Рассмотрены некоторые свойства таких пространственно-временных полей.

**Ключевые слова:** экстремальная навигация, радиоизлучение земной поверхности.

Введение понятия векторного радиотеплового поля позволяет предложить общий подход к оценке информативности различных его характеристик и их комбинаций применительно к задаче корреляционно-экстремальной навигации по радиотепловым полям.

Рассмотрим особенности оценки информационных характеристик векторных радиотепловых полей [1; 3], которые определяются отношением сигнал/шум, радиусом корреляции радиотеплового поля, стабильностью соответствующих изображений или возможностью их адекватной коррекции для конкретных условий. При этом основные задачи исследования, связанные с векторной (многомерной) природой тепловых полей, сводятся к разработке моделей векторных радиотепловых полей, определению наиболее информативных компонент поля и их комбинаций, разработке алгоритма, позволяющего оптимальным образом использовать преимущества многокомпонентности радиотеплового поля при создании радиотепловых карт для решения конкретных практических задач.

Основными ограничениями, накладываемыми на свойства вектора состояния, является независимость его компонент и нормальное распределение аддитивных помех при измерении характеристик поля.

Поскольку возможности создания радиотепловых карт определяются степенью информативности и стабильности характеристик излучения природных образований и антропогенных объектов, отражаемых на картах, степень достоверности получаемых таким образом карт можно оценивать по степени корреляции реального радиотеплового изображения исследуемого участка земной поверхности и соответствующего ему фрагмента радиотепловой карты (эталона) [2].

Для частного случая, когда каждой точке радиотеплового поля соответствует скалярная величина (радиояркая температура или, например, радиотепловой контраст), информативность поля определяется отношением среднеквадратичного отклонения радиояркой температуры (радиотеплового контраста) реального изображения к обобщенной характеристике шума [2]  $F = \sigma_P / \sigma_{ш} = \sqrt{\sum_i \sum_j P_{ij} (K_{ij} / 2)^2 / (\sigma_C^2 + \sigma_{PM}^2)}$ . Здесь  $\sigma_C^2$  -

характеризует шумы приемника;  $\sigma_{PM}^2$  - так называемый «шум эталона»;  $P_{ij}$  - вероятность появления  $ij$  контраста;  $K_{ij}$  - радиояркий контраст двух соседних объектов.

Для оценки параметров векторного поля эти соотношения необходимо модифицировать.

Рассмотрим возможные компоненты векторного радиотеплового поля. Измеряемыми величинами являются радиояркие температуры (контрасты) на разных длинах волн (спектральные), на различных поляризациях (поляризационные), при различных геометрических условиях наблюдения («геометрические»).

В качестве компонент вектора измерений могут быть использованы комбинации перечисленных величин. При этом измерения в общем случае зависимы, т.к. определяются

параметрами излучающего объема. Оценка зависимости последних сложная и неоднозначная, поэтому целесообразно воспользоваться выборочными моментами.

Результаты оценки коэффициентов корреляции радиотепловых профилей, полученных при трассовых измерениях поля радиотеплового излучения на длинах волн 0,8 и 2,25 см, выполненные в лесостепной зоне, показывают, что измерения на этих длинах волн для рассматриваемых трасс оказываются зависимыми [2; 3]. В то же время коэффициенты корреляции изменяются не только для разных трасс, но даже в пределах одной трассы они могут значительно меняться. Для анализа информационных свойств векторных радиотепловых полей удобнее использовать ортонормированные и декоррелированные компоненты вектора поля. Для этого необходимо линейное преобразование, диагонализующее корреляционную матрицу.

В качестве примера рассмотрим ковариационную матрицу радиоярких температур на двух длинах волн  $\mathbf{K} = \|t_{ij}\|$ ,  $ij=1,2$ , при этом  $t_{12} = t_{21} = (T_1 - \bar{T}_1)(T_2 - \bar{T}_2)$ .

Характеристическое уравнение для  $K$  имеет вид  $\lambda^2 - \lambda(t_{11} + t_{22}) + t_{11}t_{22} - t_{21}^2 = 0$ , а ее собственные числа будут равны  $\lambda_{1,2} = (t_{11} + t_{22})/2 \pm \sqrt{(t_{11} - t_{22})^2 + 4t_{12}^2}$ .

Зная собственные числа матрицы  $\mathbf{K}$ , находим соответствующие им собственные векторы. Например, для  $t_{12} = 0,9$ ;  $t_{11} = t_{22} = 1$  имеем  $\lambda_1 = 1,9$  и  $\lambda_2 = 0,1$ . Соответствующие им собственные векторы  $\Phi_1 = (1, 13)$ ,  $\Phi_2 = (1, -1)$ , а матрица ортонормирующего преобразования примет вид  $\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ .

Таким образом, вместо вектора поля  $\mathbf{T} = (T_1 - \bar{T}_1 \quad T_2 - \bar{T}_2)$  в расчетах следует использовать вектор  $\mathbf{T}' = \Phi\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_1 - \bar{T}_1 & T_2 - \bar{T}_2 \\ T_1 - \bar{T}_1 & -T_2 + \bar{T}_2 \end{pmatrix}$ .

Ковариационная матрица компонент вектора  $\mathbf{T}'$  имеет вид  $\mathbf{K}' = \begin{pmatrix} 1,9 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{pmatrix}$ .

Рассмотрим случай двумерного вектора  $\mathbf{T}_P$ , компонентами которого могут быть, например, радиояркая температура и ее среднеквадратичное отклонение для каждого класса объектов. Задача состоит в оценке информационных свойств такого поля.

Отклонение вектора  $\mathbf{T}_P$ , измеряемое датчиком поля (вообще говоря, компоненты вектора поля могут быть производными от измеряемых датчиком величин), от эталонного вектора  $\mathbf{T}_M$  есть вектор  $\Delta\mathbf{T}_{PM} = \mathbf{T}_P - \mathbf{T}_M$ . Соответственно отклонение модельного и реального профилей от средних:  $\Delta\mathbf{T}_M = \mathbf{T}_M - \bar{\mathbf{T}}_M$  и  $\Delta\mathbf{T}_P = \mathbf{T}_P - \tilde{\mathbf{T}}_M$ , где волнистая черта означает усреднение.

Несложно записать выражения для обобщенного «шума эталона»  $\sigma_{PM}^0$ , обобщенного шума датчика  $\sigma_C^0$  и обобщенного отклонения сигнального вектора  $\mathbf{T}$  от среднего значения  $\sigma_P^0$ :

$$\sigma_{PM}^0 = \frac{1}{mn} \sum_i \sum_j N[(\mathbf{T}_{ijP} - \mathbf{T}_P) - (\mathbf{T}_{ijM} - \tilde{\mathbf{T}}_M)] \quad \sigma_C^0 = \frac{1}{mn} \sum_i \sum_j N(\delta_{ij}) \quad \sigma_P^0 = \frac{1}{mn} \sum_i \sum_j N(\mathbf{T}_{ij} - \tilde{\mathbf{T}}_P).$$

В приведенных выражениях  $N$  означает принятую метрику или какой-либо критерий. Например, это может быть длина вектора, тогда обобщенные отклонения равны квадрату длины. Отношение сигнал/шум запишется в виде  $F = \sqrt{\sigma_P^0} / \sqrt{\sigma_C^0 + \sigma_{PM}^0}$ .

Отметим еще один подход для двумерных векторных полей. Компоненты вектора поля отождествляются с вещественной и мнимой частями комплексного числа, тогда можно прийти к одномерному случайному комплексному полю. В качестве меры отклонения можно

использовать модуль комплексного числа.

Проведем анализ корреляционной функции радиотеплового поля. Вектор поля будем считать функцией координат  $(x, y)$ , т.е.  $T = \vec{i}T_{Я}(x, y) + \vec{j}\sigma(x, y)$ .

Найдем функцию взаимной корреляции эталонного поля (т.е. карты местности) и реального поля  $K_{PM}(a, b)$ , используя смешанный момент второго порядка  $B_{PM}(a, b)$

$$B_{PM}(a, b) = \iint [\vec{i}T_{ЯP}(x, y) + \vec{j}\sigma_P(x, y)] [\vec{i}T_{ЯM}(x+a, y+b) + \vec{j}\sigma_M(x+a, y+b)] dx dy.$$

Преобразуя полученное соотношение, получим  $B_{PM}(a, b) = B_{PM}^T(a, b) + B_{PM}^\sigma(a, b)$ , где  $B_{PM}^T$  и  $B_{PM}^\sigma$  - соответствующие моменты для радиояркостной температуры и среднеквадратичного отклонения.

Полученные соотношения дают возможность найти нормированную корреляционную функцию  $K_{PM}(a, b) = \frac{B_{PM}^T(a, b) + B_{PM}^\sigma(a, b) - [\bar{T}_P\bar{T}_M - \bar{\sigma}_P\bar{\sigma}_M]}{B_{PM}^T(0, 0) + B_{PM}^\sigma(0, 0) - [\bar{T}_P\bar{T}_M - \bar{\sigma}_P\bar{\sigma}_M]}$ .

Как видно, в первом приближении нормированная взаимная корреляционная функция отождествляется со средним арифметическим взаимных функций корреляции каждой из ортогональных компонент. В силу того, что речь идет о случайных независимых и примерно одинаково распределенных величинах, то среднеквадратичное отклонение их суммарного распределения примерно в  $\sqrt{n}$  раз (где  $n$  - число слагаемых) меньше соответствующей величины отдельного распределения, и, таким образом, зависимость  $K_{PM}(a, b)$  оказывается более точной.

С учетом сказанного находим, что отношение сигнал/шум в этом случае улучшается пропорционально отношению  $P = \sqrt{\frac{n(\sigma_C^2 + \sigma_{PM}^2)}{n\sigma_C^2 + \sigma_{PM}^2}}$ .

При сделанном выше допущении о примерно одинаковых законах распределения суммарных величин полученное соотношение имеет ограниченную область применения, так как для векторных радиотепловых полей число компонент относительно невелико и их информативность может достаточно сильно различаться, также как и законы распределений.

В качестве примера в табл. 1 приведены значения коэффициента корреляции для участка трассы в зоне лесостепи с болотом, заболоченностями и населенным пунктом [2].

Для перечисленных объектов характерны высокие значения среднеквадратичного отклонения радиояркостной температуры, что наряду со средним значением температуры также является информативным признаком. В нижней строке таблицы приведены значения влажности почвы, при которых достигается максимальный коэффициент корреляции. Для каждой трассы приводятся два значения коэффициента корреляции и отношения сигнал/шум. Нижний соответствует рассчитанному для скалярного поля, верхний – для векторного, когда в качестве второй компоненты использовалось среднеквадратичное отклонение радиояркостной температуры. Для болот и заболоченностей  $\sigma = 34,4$  К, для населенного пункта  $\sigma = 8,4$  К. Среднеквадратичные отклонения для остальных объектов принимались равными экспериментальным и не превышали 3 К.

Как видно из таблицы, информационные характеристики двумерного поля заметно лучше, чем скалярного, однако следует учесть, что в эталонном поле (карте местности) при определении среднеквадратичных отклонений использовались экспериментальные значения.

Отметим, что выбор весовых коэффициентов, определяющих вклад каждой компоненты в суммарные информативные характеристики векторного поля, зависит от степени доверия к соответствующему однокомпонентному параметру и определяется особенностями конкретной трассы.

Таблица 1

Информативные характеристики векторного радиотеплового поля

	Профиль 1	Профиль 2	Профиль 3	Профиль 4
<b>Относительная длина:</b>				
- водоемов, %	14,8	-	15,5	-
- болот и заболоченных участков	16,9	7,0	20,5	7,7
- населенных пунктов	3,8	6,1	3,5	6,7
<b>Экспериментальные значения:</b>				
- болот и заболоченных участков	256,7	264,1	210,2	228,2
- населенных участков	255,1	255,1	250,5	250,0
Область влажности, соответствующая максимуму, %	5-7,5	5-8	10,5-12,5	10-12

Таким образом, предложенный подход позволяет оценить информационные характеристики векторных радиотепловых полей. В предельном случае однокомпонентного векторного поля полученные формулы преобразуются в ранее предложенные для скалярного поля. Показано, что для конкретной трассы использование двухкомпонентного векторного поля позволяет получить более высокие информативные характеристики, чем в случае скалярного поля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Eckhardt U., Shestopalov Yu.K., Troitsky V.I. Utilization of vector radiothermal fields for solving remote sensing and image interpretation problems. Proceeding of XVII Congress International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, 1992.

2. Троицкий В.И., Шестопалов Ю.К., Подковко Н.Ф. Радиотепловые карты местности, используемые в корреляционно-экстремальных навигационных системах // Вопросы радиоэлектроники, серия Общие вопросы радиоэлектроники. - 1992. - №10.

3. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. – М.: Радиотехника, 2011. –Т. 3.

#### INFORMATION CONTENT OF VECTOR RADIOTHERMAL FIELDS IN THE PROBLEM OF CORRELATION-EXTREMAL NAVIGATION OF AIRCRAFT

Troitsky V.I.

Various informative characteristics of radio thermal fields for generating the standard images in correlation-extremal navigation systems are considered as components of a vector field. Some properties of such space-time fields are described.

**Keywords:** correlation-extremal navigation, ground radiation.

#### Сведения об авторе

Троицкий Владимир Иванович, 1942 г.р., окончил МФТИ (1965), профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой физики Московского государственного университета геодезии и картографии, автор более 160 научных работ, область научных интересов – теория антенн (синтез антенн, фазированные антенные решетки), оптические системы, лазерная локация, волоконно-оптическая связь, исследование радиотеплового излучения земных покровов в СВЧ диапазоне и его использование в прикладных задачах.