

УДК 621.396

ВЕКТОРНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАДИОТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО СОБСТВЕННОМУ РАДИОИЗЛУЧЕНИЮ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.И. ТРОИЦКИЙ

Различные информативные характеристики радиотеплового поля, используемые для создания эталонных изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации, можно рассматривать как компоненты векторного поля.

Ключевые слова: экстремальная навигация, радиоизлучение земной поверхности.

Рассмотрим радиотепловое поле земной поверхности. Известно, что одному элементу разрешения на местности (x, y, z) можно сопоставить: радиояркие температуры на разных длинах волн (спектральные измерения) и на различных поляризациях (поляризационные измерения), радиояркие контрасты. Эти характеристики являются функциями времени, а поэтому компоненты радиотеплового поля ξ_i можно рассматривать как функции в четырехмерном пространстве (x, y, z, t) , а исследуемые радиотепловые поля относить к пространственно-временным полям [1].

Рассмотрим некоторые свойства таких полей. Полное задание одномерного случайного поля $\xi(Q)$, где $Q=(x, y, z, t)$, означает знание всех его n -мерных ПРВ, т.е. считаются известными функции $W_n(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) d\xi_1 d\xi_2 \dots d\xi_n = P\{\xi_v \leq \xi(Q_v) < \xi_v + d\xi_v, (v=1, 2, \dots, n)\}$, где $P\{\xi_v \leq \xi(Q_v) < \xi_v + d\xi_v\}$ - вероятность того, что случайная величина приняла значение в указанном интервале.

При некоторых довольно общих ограничениях описание пространственно-временного поля упрощается. К таким ограничениям относится свойство однородности поля, т.е. инвариантность плотностей вероятности W_n по отношению к пространственному сдвигу $\vec{r} \rightarrow \vec{r} + \delta\vec{r}$. Фактически это понятие является обобщением известного понятия стационарности для случайных процессов. Поле может быть однородным по части параметров: о стационарных, но пространственно-неоднородных полях или, наоборот, об однородных, но нестационарных полях. Полезным является также понятие однородности поля на определенной поверхности (в частности, на плоскости).

Для анализа информативных свойств полей различной природы обычно используют моменты первого и второго порядка: среднее значение $\bar{\xi}(Q) = \int W_1(\xi) d\xi$; смешанный момент второго порядка $B_\xi(Q_1, Q_2) = \overline{\xi(Q_1)\xi(Q_2)} = \iint \xi_1 \xi_2 W_2(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2$; флуктуационная часть $\tilde{\xi} = \xi - \bar{\xi}$; автокорреляционная часть $\Psi_\xi(Q_1, Q_2) = \overline{\xi(Q_1)\xi(Q_2)} = B_\xi(Q_1, Q_2) - \bar{\xi}(Q_1)\bar{\xi}(Q_2)$; дисперсия случайного поля $D(\xi) = \sigma_\xi^2(Q) = \overline{[\xi(Q_1) - \bar{\xi}(Q_1)]^2} = \Psi_\xi(Q_1, Q_1)$.

Приведенные соотношения несложно обобщить на случай векторного поля. При этом следует говорить о средних значениях каждой i -й компоненты $\bar{\xi}_i(Q)$.

Если речь идет об N -мерном поле с компонентами $\xi_i(Q)$, то оно описывается nN -мерными ПРВ $W_{nN}(\xi_{11}, \xi_{21}, \dots, \xi_{nN}) d\xi_{11} d\xi_{21} \dots d\xi_{nN} = P\{\xi_{vi} \leq \xi_i(Q_v) < \xi_{vi} + d\xi_{vi}, (v=1, n; i=1, N)\}$.

Вместо последних двух соотношений целесообразно говорить соответственно о матрице второго порядка с элементами $B_{ik}(1, 2) = \overline{\xi_i(1)\xi_k(2)}$ и корреляционной матрице с элементами $\psi_{ik} = B_{ik}(1, 2) - \bar{\xi}_i(1)\bar{\xi}_k(2)$. При $i=k$ имеем соответствующие функции корреляции, при $i \neq k$ - функции взаимной корреляции.

Часто приходится иметь дело с двухкомпонентным векторным полем, которое можно представить в виде одномерного комплексного случайного поля $\xi^{\oplus}(\vec{r}) = \xi(\vec{r}) + i\eta(\vec{r})$ [4].

Автокорреляционная функция определится как $\psi_{\xi}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \overline{\xi(\vec{r}_1)\xi^*(\vec{r}_2)} - \overline{\xi(\vec{r}_1)}\overline{\xi^*(\vec{r}_2)}$, а дисперсия $\sigma_S^2(\vec{r}) = \psi_{\xi}(\vec{r}, \vec{r}) = \sigma_{\xi}^2 + \sigma_{\eta}^2$. Отметим эрмитовность корреляционной функции, т.е. $\psi_{\xi}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \psi_{\xi}^*(\vec{r}_2, \vec{r}_1)$ и то, что $|\psi_{\xi}(\vec{r}_1, \vec{r}_2)|^2 \leq \sigma_{\xi}^2(\vec{r}_1)\sigma_{\xi}^2(\vec{r}_2)$.

Функция $\psi_{\xi}(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ является положительно определенной, т.е.

$$\iint_V \psi_{\xi}(\vec{r}_1, \vec{r}_1)U(\vec{r}_1)U^*(\vec{r}_2)d^3\vec{r}_1d^3\vec{r}_2 \geq 0,$$

где $U(\vec{r})$ - произвольная комплексная функция; V - область интегрирования, в которой существует интеграл.

Рассмотрим более подробно векторные радиотепловые поля. Радиояркостная температура, полученная на основе радиотеплового изображения местности с борта носителя, является функцией условий измерения, длины волны, поляризационных характеристик приемной антенны, поляризации радиотеплового излучения объекта и его электрофизических и геометрических характеристик и фона. Условно указанные зависимости можно записать в виде $T_{Я} = T_{Я}(\vec{P}, \vec{\lambda}, \vec{\theta}, \vec{\varepsilon}, \vec{A})$, где \vec{P} - совокупность поляризационных параметров (приемная антенна, поляризация радиотеплового сигнала); $\vec{\lambda}$ - вектор, описывающий спектральные характеристики принимаемого сигнала и приемного устройства (амплитудно-фазовая характеристика, центральная частота); $\vec{\theta}$ - условия наблюдения (угол визирования, азимутальный угол, характеристики антенной системы); $\vec{\varepsilon}$ - параметры излучающего объекта (диэлектрическая проницаемость, геометрия неровностей, неоднородность, температура, ее распределение, соленость и т.д.); \vec{A} - смежные (фоновые; мешающие) факторы (в ряде случаев переотраженное излучение атмосферы, осадки, излучение соседних объектов, погрешности измерения, шумы приемника, влияние корпуса носителя и др.).

Оценку среднего значения регистрируемой радиояркостной температуры можно определить из соотношения $T_{Я} = \int_V W(\vec{K})T_{Я}(\vec{K})d\vec{K}$, где $\vec{K} = \{\vec{P}, \vec{\lambda}, \vec{\theta}, \vec{\varepsilon}, \vec{A}\}$.

Классическое определение, как известно, подразумевает совсем иной подход к оценке среднего значения $T_{Я} = T_{Я}(\vec{P}, \vec{\lambda}, \vec{\theta}, \vec{\varepsilon}, \vec{A})$ [3].

Как видно, эти оценки могут существенно различаться. В то же время определение $W(K_i)$ для задачи создания радиотепловых карт местности практически невозможно из-за заведомого отсутствия соответствующей априорной информации. Таким образом, необходимо оценить правомерность использования названных оценок. При малых погрешностях оценки компонент вектора \vec{K}_i эта задача решается дифференцированием в частных производных с последующей оценкой $\delta T_{Я_i}$, на основе какой-либо метрики (чаще сферической). Анализ показывает, в подавляющем большинстве случаев такой подход является правомерным. Конкретные расчеты для ряда задач приведены, например, в [4].

Рассмотрим аргументы соотношений с точки зрения пространственно-временной зависимости. Параметр \vec{P} , как уже было сказано, представляет совокупность поляризационных параметров приемной аппаратуры \vec{P}_A и радиотеплового сигнала \vec{P}_S . При этом \vec{P}_A не зависит от $Q=(x, y, z)$. В отдельно оговоренных случаях может иметь место временная зависимость $\vec{P}_A(t)$, однако на практике эту группу параметров можно считать инвариантной к пространству и времени. Дополнительным аргументом в пользу выделения поляризационных параметров в

отдельную группу является простая зависимость, позволяющая определить интенсивность сигнала на выходе приемника. При этом достаточно знать поляризационную структуру принимаемого сигнала и поляризационные характеристики антенны. Используя комплексные векторы, интенсивность радиотеплового сигнала на выходе антенны можно определить следующим образом $I_a = K \left| \left(\vec{E}, \vec{H} \right) \right|^2$ [3], где \vec{E} - комплексный вектор, описывающий поляризацию сигнала; \vec{H} - поляризационная характеристика приемной антенны; K - постоянная.

Вектор P_s определяется параметрами излучающего объекта, которые могут зависеть как от координат (x, y, z) , так и от времени (например, влажность почв).

Что касается спектральных характеристик приемника и принимаемого сигнала, то первые обладают достаточно высокой стабильностью. Принимаемый сигнал представляет собой с высокой степенью приближения «белый шум». Амплитудно-фазовая характеристика принимаемого сигнала $K(\omega) = K_n(\omega) G_C(\omega)$.

Ширина входной полосы $\Delta\omega$ много меньше ω_0 , соответственно $\Delta\lambda \ll \lambda_0$ и, следовательно, можно считать $\vec{\lambda}_i = const$. Вектор наблюдения Q_i изменяется вследствие эволюции носителя, зависит от рельефа местности (угол визирования определяется как угол между нормалью к исследуемой поверхности и направлением наблюдения). В общем случае $\vec{Q} = \vec{Q}(\theta_1, t)$, однако при обеспечении аппаратуры гиостабилизацией, а также при использовании специальных методов коррекции искажений получаемого радиотеплового изображения вследствие эволюций носителя и влияния антенной системы зависимостью от времени можно пренебречь. Таким образом, в большинстве случаев можно считать $\vec{\theta} = \vec{\theta}(Q)$. Параметры излучающего объекта (вектор \vec{E}) зависят как от времени, так и от местоположения исследуемого участка поверхности $\vec{E} = \vec{E}(Q, t)$. Смежные факторы зависят также от координат текущего элемента разрешения, времени и, кроме того, от параметров объекта (например, переотраженное излучение аппаратуры), т.е. $\vec{A} = A(\vec{E}, Q, t)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eckhardt U., Shestopalov Yu.K., Troitsky V.I. Utilization of vector radiothermal field for solving remote sensing and image interpretation problems. Proceeding of XVII Congress International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, 1992.
2. Рыгов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую физику. Случайные поля. – М.: Наука, 1978.
3. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. – М.: Радиотехника, 2008. – Т. 1.
4. Шестопалов Ю.К. Некогерентное многократное рассеяние волн на статистически неровных поверхностях // Радиотехника. – 1989. - №4.

VECTOR INTERPRETATION OF THE RADIO THERMAL FIELDS IN THE PROBLEM OF CORRELATION - EXTREMAL NAVIGATION OF AIRCRAFT ON GROUND RADIATION

Troitsky V.I.

Various informative characteristics of radio thermal fields for generating the standard images in correlation-extremal navigation systems, can be considered as components of a vector field.

Keywords: 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.