УДК 519.6:629.8

В. К. ВОЛОСЮК, канд. техн. наук

АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Рассмотрим общую методику оптимизации дистанционных измерений параметров поверхностей на основе электродинамических моделей рассеянных полей. Параметрами поверхности являются высотный профиль поверхности, диэлектрическая проницаемость и связанные с нею влажность, соленость, плотность. В случае ледовой разведки — это толщина ледового покрова, его диэлектрические, физико-механические и другие характеристики. При постановке задачи следует учитывать, что процесс измерения может быть организован в различных точках пространства и в различные моменты времени как на неподвижных относительно поверхности, так и движущихся аэрокосмических носителях.

Зондирующий сигнал в общем виде можно записать следующим образом: $s_k(t) = \mathrm{Re}\,[\dot{B}_k(t)\,e^{j\omega_0 t}]$ (1). Здесь $\dot{B}_k(t)$ — комплексная огибающая, индекс k характеризует поляризацию колебаний, $k = (\text{В}, \text{Г})$. В такой форме выражение (1) представляет широкий класс простых и сложных сигналов, как непрерывных, так и импульсных.

Сигнал, рассеянный поверхностью Ω и принимаемый в точке $\vec{r}'$ апертуры Ω' в момент времени t, представим в виде:

$$\dot{s}_{kl}(t, \vec{r}') = \int\limits_{\Omega} \dot{F}_{kl}[\vec{\lambda}(\vec{r}), \vec{r}, \vec{r}']\, \dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}')\, d\vec{r}, \qquad (2)$$

где $\vec{\lambda}(\vec{r})$ — вектор параметров, подлежащих оценке и рассматриваемых как функции координат $\vec{r}$ подстилающей (средней относительно неровностей) поверхности, $\vec{\lambda}(\vec{r}) = [\lambda_1(\vec{r}), \lambda_2(\vec{r}), \ldots \lambda_n(\vec{r})]$; $\dot{F}_{kl}[\vec{\lambda}(\vec{r}), \vec{r}, \vec{r}']$ — функция, характеризующая локальные бистатические свойства рассеяния элементом поверхности $d\vec{r}$. Зависимость этой функции от координат $\vec{r}'$ обусловлена тем, что одни и те же участки поверхности имеют различные коэффициенты рассеяния относительно различных точек апертуры Ω'; $\dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}')$ — опорный сигнал, рассеянный элементом $d\vec{r}$ и зависящий лишь от формы зондирующего сигнала, геометрии задачи и характера движения приемо-передающей системы. Индексы k, l характеризуют поляризацию сигнала. Первый индекс указывает на поляризацию падающей волны, второй — рассеянной.

В качестве модели принимаемого сигнала примем аддитивную смесь

$$U_{kl}(t, \vec{r}') = \mathrm{Re}\,\dot{s}_{kl}(t, \vec{r}') + n_{kl}(t, \vec{r}'), \qquad (3)$$

где $n_{kl}(t, \vec{r}')$ — дельта-коррелированный нормальный случайный процесс, учитывающий аддитивный шум и неточность задания модели полезного сигнала, связанную со сложностью решения прямых электродинамических задач относительно выбранных типов поверхностей при определении функции $\dot{F}_{kl}$. В такой постановке задача оценки параметров $\vec{\lambda}(\vec{r})$ является обратной и может быть отнесена к классу задач количественной и сложной (качественно-количественной) интерпретации [1].

Полагая, что априорные сведения о функциях $\vec{\lambda}(\vec{r})$ отсутствуют, оценим эти параметры методом максимального правдоподобия. Тогда условный функционал плотности вероятности

$$p\,[U_{kl}(t, \vec{r}')/\vec{\lambda}(\vec{r})] = k \exp\left\{-\frac{1}{N_{0kl}}\int\limits_T\int\limits_{\Omega'}[U_{kl}(t, \vec{r}') - \operatorname{Re} s_{kl}(t, \vec{r}')]^2\, dt\, d\vec{r}'\right\}, \tag{4}$$

где T — промежуток времени наблюдения; N_{0kl} — спектральная плотность мощности процесса $n_{kl}(t, \vec{r}')$.

Максимум функционала (4) можно найти из условия равенства нулю его первой вариации. Пусть $\hat{\vec{\lambda}}(\vec{r})$ — оценка параметра, $\delta\vec{\lambda}(\vec{r})$ — его вариация, $\delta\vec{\lambda}(\vec{r}) = A\vec{\gamma}(\vec{r})$ (5), где $A = \operatorname{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n)$ — диагональная матрица; $\vec{\gamma}(\vec{r})$ — произвольная векторная функция. Тогда оценки $\hat{\vec{\lambda}}(\vec{r})$ найдем из решения системы уравнений

$$\left.\frac{\partial p\,[U_{kl}(t, \vec{r}')/\vec{\lambda}(\vec{r})]}{\partial\lambda_j}\right|_{\alpha_j = 0} = 0, \tag{6}$$

или

$$\int\limits_T\int\limits_{\Omega'}\left\{\left[U_{kl}(t, \vec{r}') - \operatorname{Re}\int\limits_{\Omega}\dot{F}_{kl}(\lambda_1, \ldots, \lambda_j, \ldots, \lambda_n, \vec{r}, \vec{r}')\,\times\right.\right.$$
$$\left.\times\, \dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}')\,dr\right]\operatorname{Re}\int\limits_{\Omega}\frac{\partial\dot{F}_{kl}(\cdot)}{\partial\lambda_j}\,\dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}')\,\times$$
$$\left.\times\,\gamma_j(\vec{r})\,d\vec{r}\right\}dt\,d\vec{r}' = 0. \tag{7}$$

После несложных преобразований получим следующую систему интегральных уравнений:

$$\int\limits_T\int\limits_{\Omega'}U_{kl}(t, \vec{r}')\,\frac{\partial\dot{F}_{kl}(\lambda_1, \lambda_j, \lambda_n, \vec{r}, \vec{r}')}{\partial\lambda_j}\,s_0(t, \vec{r}, \vec{r}')\,d\vec{r}'\,dt =$$
$$= \frac{1}{2}\int\limits_T\int\limits_{\Omega}\int\limits_{\Omega'}\frac{\partial\dot{F}_{kl}(\cdot, \vec{r}_1, \vec{r}')}{\partial\lambda_j}\,\dot{F}^*_{kl}(\cdot, \vec{r}_1, \vec{r}')\,s_0(t, \vec{r}, \vec{r}')\,\times$$
$$\times\, s_0^*(t, \vec{r}_1, \vec{r}')\,d\vec{r}'\,d\vec{r}_1\,dt. \tag{8}$$

Систему уравнений (8) можно упростить, если предположить, что размеры апертуры Ω' значительно меньше высоты ее расположения над исследуемой поверхностью. В этом случае считаем, что функция $\dot{F}_{kl}$ практически не зависит от координат $\vec{r}'$. Тогда множитель $\partial F_{kl}/\partial\lambda_j$ в правой и левой частях выражения (8) выносится за пределы интегралов и сокращается, а система уравнений (8) приобретает вид:

$$\int\limits_T\int\limits_{\Omega'} U_{kl}(t, \vec{r})\dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}')\,d\vec{r}\,dt = \frac{1}{2}\int\limits_T\int\limits_{\Omega}\int\limits_{\Omega'} \dot{F}^*_{kl}(\lambda_1, \ldots, \lambda_j, \ldots, \lambda_n, \vec{r}_1)\times$$
$$\times\,\dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}')\dot{s}^*_0(t, \vec{r}_1, \vec{r}')\,d\vec{r}'\,d\vec{r}_1\,dt. \qquad (9)$$

В дальнейшем целесообразно рассмотреть ряд практически полезных случаев:

1. Статическая голографическая система.

Апертура Ω' неподвижная, огибающая $\dot{B}(t) = \dot{B}_0 = \mathrm{const}$. Опорный сигнал запишем так: $\dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}') = \dot{B}_0 e^{j\omega_0 t}\dot{K}(\vec{r}, \vec{r}')$ (10), где

$$\dot{K}(\vec{r}, \vec{r}') = \dot{G}(\vec{r})\cos\beta(\vec{r})\cos\beta_1(\vec{r}, \vec{r}')\times$$
$$\times\,\frac{\exp\{jk[R(\vec{r}) + R_1(\vec{r}, \vec{r}')]\}}{R(\vec{r})R_1(\vec{r}, \vec{r}')}. \qquad (11)$$

Здесь $\dot{G}(\vec{r})$ — функция, характеризующая степень облучения поверхности и в пересчете к угловым координатам, является диаграммой направленности передающей антенны; $R(\vec{r})$ — расстояние от точки с координатами $\vec{r}$; $R_1(\vec{r}, \vec{r}')$ — расстояние от точки $\vec{r}$ на поверхности Ω до точки $\vec{r}'$ на апертуре Ω'; $\beta(\vec{r})$ — угол между нормалью к подстилающей поверхности в точке $\vec{r}'$ и направлением $\vec{R}$; $\beta_1(\vec{r}, \vec{r}')$ — угол между той же нормалью и направлением $\vec{R}_1$. В этом случае система уравнений (9) существенно упрощается

$$\int\limits_{\Omega'} \dot{K}(\vec{r}, \vec{r}')\,\dot{v}_{kl}(\vec{r}')\,d\vec{r}' = \int\limits_{\Omega} \dot{F}^*_{kl}[\lambda_1, \ldots, \lambda_j, \ldots, \lambda_n, \vec{r}_1]\times$$
$$\times\,\dot{\psi}(\vec{r}, \vec{r}_1)\,d\vec{r}_1, \qquad (12)$$

где $\dot{v}_{kl}$ — результат согласованной фильтрации монохроматического колебания в течение времени T в каждой точке апертуры Ω',

$$\dot{v}_{kl}(\vec{r}') = \dot{B}_0\int\limits_T U(t, \vec{r}')e^{j\omega_0 t}\,dt; \qquad (13)$$

$\dot{\psi}(\vec{r}, \vec{r}_1)$ — функция Грина (функция неопределенности) системы (12), сглаживающей реальную зависимость $\dot{F}_{kl}$ от координат $\vec{r}$,

$$\dot{\psi}(\vec{r}, \vec{r}_1) = |B|^2\int\limits_{\Omega'} \dot{K}(\vec{r}, \vec{r}')\dot{K}^*(\vec{r}_1, \vec{r}')\,d\vec{r}'. \qquad (14)$$

Эта функция, являясь ядром интегрального преобразования L в правой части (12), характеризует возможность восстановления функции $\dot{F}_{kl}$ и точность измерения параметров $\vec{\lambda}(\vec{r})$. При достаточно широкой диаграмме направленности и справедливости предположений, использовавшихся при выводе (9), функция неопределенности имеет следующий вид:

$$\dot{\psi}(\vec{r},\ \vec{r}_1) = c_1 \frac{\exp\{jk[R(\vec{r}) - R(\vec{r}_1)]\}}{R(\vec{r})\,R(\vec{r}_1)} \times$$

$$\times \int\limits_{\Omega'} \frac{\exp\{jk[R_1(\vec{r},\vec{r}') - R_1(\vec{r}_1,\vec{r}')]\}}{R_1(\vec{r},\vec{r}')\,R_1(\vec{r}_1,\vec{r}')} d\vec{r}'. \tag{14a}$$

Выражения (12), (14) приобретают конкретный вид для конкретной геометрии задачи. Например, в приближении Френеля, для прямоугольной апертуры Ω'

$$\int\limits_{\Omega'} \dot{K}(\vec{r},\vec{r}')\,\dot{v}_{kl}(\vec{r}')\,d\vec{r}' = \{\Phi_{\Omega'}[\dot{v}_{kl}(\vec{r}')]\} \exp\left[jk\left(2H + \frac{x^2+y^2}{2H}\right)\right], \tag{15}$$

где $\Phi_{\Omega'}[\dot{v}_{kl}(\vec{r}')]$ — оператор Френеля, действующий в пределах апертуры Ω',

$$\Phi_{\Omega'}[\dot{v}_{kl}(\vec{r}')] = \int\limits_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int\limits_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \dot{v}_{kl}(x',y') \exp\left\{\frac{jk}{2H}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} dxdy; \tag{16}$$

$$\Omega' = \left\{-\frac{a}{2} \leqslant x' \leqslant \frac{a}{2},\quad -\frac{b}{2} \leqslant y' \leqslant \frac{b}{2}\right\}; \tag{17}$$

H — высота расположения апертуры Ω' над поверхностью. Функция неопределенности

$$\Psi(\Delta\vec{r}) = c_2 \frac{ab}{2} \exp\left\{-\frac{jk}{2H}[\Delta x^2 + \Delta y^2 - 2(x\Delta x + y\Delta y)]\right\} \times \tag{18}$$

$$\times \operatorname{sinc}\left(\frac{ka}{2H}\Delta x\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{kb}{2H}\Delta y\right),$$

где Δx, Δy — приращения координат $\vec{r} = (x, y)$ на плоской подстилающей поверхности; c_2 — константа. Аналогично, пренебрегая кривизной волнового фронта, получаем необходимые выражения для (12), (14) в приближении Фраунгофера.

Записывая (12) в операторной форме

$$\dot{Y}_{kl}(\vec{r}) = \Phi[\dot{v}_{kl}(\vec{r}')] = L\{\dot{F}_{kl}[\vec{r},\hat{\vec{\lambda}}(\vec{r})]\}, \tag{19}$$

где Φ, L — линейные операторы, приходим к системе нелинейных уравнений для оценок $\hat{\vec{\lambda}}(\vec{r})$

$$\dot{F}_{kl}[\vec{r},\hat{\vec{\lambda}}(\vec{r})] = L^{-1}[\dot{Y}_{kl}(\vec{r})]. \tag{20}$$

Таким образом, процедура оптимальной интерпретации в случае монохроматического излучаемого сигнала может быть проведена в следующей последовательности. Принятое поле в каждой точке поверхности подвергается согласованной временной фильтрации. Затем полученные результаты интегрируются по поверхности Ω' с весом $\dot{K}(\vec{r}, \vec{r}')$. Оценки реальных функций $\dot{F}_{kl}$ находятся путем применения обратного интегрального преобразования L^{-1}. Найденные оценки приравниваются к модельным зависимостям $\dot{F}_{kl}[\vec{r}, \widehat{\vec{\lambda}}(r)]$, определенным в результате решения прямых электродинамических задач для выбранных моделей рассеивающих поверхностей. И, наконец, оценки $\widehat{\vec{\lambda}}(\vec{r})$ находятся из полученной системы нелинейных уравнений.

2. Апертура неподвижная. Огибающая $\dot{B}(t)$ удовлетворяет условию пространственно-временной узкополосности, т. е. запаздыванием огибающей относительно различных точек апертуры можно пренебречь. Этому условию обычно удовлетворяют большинство радиолокационных сигналов, в том числе и сложных. Тогда

$$\dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}') = \dot{B}\left[t - \frac{2R(\vec{r})}{c}\right] \dot{K}(\vec{r}, \vec{r}')\, e^{j\omega_0 t}. \tag{21}$$

В этом случае система уравнений (12) остается такой же, но

$$\dot{v}_{kl}(\vec{r}') = \int_T U_{kl}(t, \vec{r})\, \dot{B}\left[t - \frac{2R(\vec{r})}{c}\right] e^{j\omega_0 t}\, dt. \tag{22}$$

Функция неопределенности $\dot{\psi}(\vec{r}, \vec{r}_1) = \dot{\psi}_T(\vec{r}, \vec{r}_1)\, \dot{\psi}_{\Omega'}(\vec{r}, \vec{r}_1)$ (23), где функция $\dot{\psi}_{\Omega'}(\vec{r}, \vec{r}_1)$ совпадает с (14) или с (18), а функция $\dot{\psi}_T(\vec{r}, \vec{r}_1)$ — функция неопределенности Вудворта:

$$\dot{\psi}_T(\vec{r}, \vec{r}_1) = \int_T \dot{U}\left[t - \frac{2R(\vec{r})}{c}\right] \dot{U}^*\left[t - \frac{2R(\vec{r}_1)}{c}\right] dt. \tag{24}$$

Таким образом, точность интерпретации определяется не только размерами апертуры Ω', но и формой огибающей зондирующего сигнала.

Последовательность операций при интерпретации здесь остается такой же, как и в случае применения монохроматического зондирующего сигнала.

3. Система бокового обзора типа РСА. Антенна длиной d располагается на движущемся носителе вдоль направления движения. Опорный сигнал имеет следующий вид [2]:

$$\dot{s}(t, \vec{r}, \vec{r}') = \dot{s}(t, \vec{r}) = \dot{G}\left(t - \frac{x}{\vartheta}\right) \dot{B}\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) \times$$

$$\times \exp\left\{-jk\frac{(\vartheta t - x)^2}{R}\right\} \exp\left[j(\omega_0 t - 2kR_0)\right], \tag{25}$$

где $R_0 = \sqrt{H^2 + y^2}$, $\vec{r} = (R_0, x)$.

Система уравнений, аналогичная системе (8), в этом случае записывается так:

$$\int_0^T U_{kl}(t)\frac{\partial F_{kl}(\vec{r}, \lambda_1, \ldots, \widehat{\lambda}_j, \ldots, \lambda_n, t)}{\partial \lambda_j}\dot{s}_0(t, \vec{r})\,dt =$$

$$= \frac{1}{2}\int_\Omega \int_T \frac{\partial F_{kl}(\cdot)}{\partial \lambda_j} F^*_{kl}(\cdot)\,\dot{s}_0(t, \vec{r})\,\dot{s}^*_0(t, \vec{r}_1)\,dt\,d\vec{r}_1. \qquad (26)$$

Зависимость $\dot{F}_{kl}$ от времени t здесь обусловлена теми же причинами, что и зависимость этой функции от $\vec{r}'$ при рассмотрении предыдущих систем. Однако в реальных системах бокового обзора с синтезированной апертурой диаграмма направленности $\dot{G}\left(t - \frac{x}{\vartheta}\right)$ в пересчете к угловой координате составляет несколько градусов и зависимостью функции $\dot{F}_{kl}$ от времени t можно пренебречь. Тогда, в обеих частях (26) производная $\partial \dot{F}_{kl}/\partial \lambda_j$ выносится за знаки интегралов, сокращается, и в результате получим систему интегральных уравнений следующего вида:

$$\dot{Y}_{kl}(\vec{r}) = \int_T U_{kl}(t)\,\dot{s}_0(t, \vec{r})\,dt = \frac{1}{2}\int_\Omega \dot{F}_{kl}[\vec{r}, \widehat{\vec{\lambda}}(\vec{r})] \times \dot{\psi}(\vec{r} - \vec{r}_1)\,d\vec{r}_1, \qquad (27)$$

где $\dot{\psi}_{kl}(\vec{r} - \vec{r}_1)$ — функция неопределенности системы бокового обзора с синтезированной апертурой $\dot{\psi}_{kl}(\vec{r} - \vec{r}_1) = \int_T \dot{s}_0(t, \vec{r})\,\dot{s}^*_0(t, \vec{r}_1)\,dt$. Конкретные выражения этой функции для непрерывного и импульсного сигналов рассмотрены в работе [2].

В операторной форме выражение (27) имеет вид, аналогичный выражению (19)

$$\dot{Y}_{kl}(\vec{r}) = L\{\dot{F}_{kl}[\vec{r}, \widehat{\vec{\lambda}}(\vec{r})]\}.$$

Процедура оптимальной интерпретации в этом случае заключается в формировании выходного эффекта $\dot{Y}_{kl}(\vec{r})$ путем интегрирования принимаемого колебания $U_{kl}(t)$ в течение времени T с весом $\dot{s}_0(t, \vec{r})$, обращения интегрального преобразования L и решения системы нелинейных уравнений, аналогичной системе (20).

Следует отметить, что для определения всех параметров $\vec{\lambda}(\vec{r})$ необходимо иметь набор нелинейных уравнений в количестве, не меньшем количества определяемых параметров. Такой набор может быть получен либо за счет использования сигналов различных поляризаций, либо за счет формирования функций $\dot{Y}(\vec{r})$ для различных углов обзора поверхности.

Список литературы: 1. *Гольцман Ф. М.* Статистические модели интерпретации.— М. : Наука, 1971.— 327 с. 2. *Палькович С. Е., Хомяков Э. Н.* Статистическая теория измерительных радиосистем.— М. : Радио и связь, 1981.— 287 с.

Поступила в редколлегию 15.07.86

УДК 621.391

П. А. БРАНДИС, канд. техн. наук, *А. Л. КУЛИКОВ*

МЕТОД УСКОРЕННОГО УМНОЖЕНИЯ ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Аппаратная реализация алгоритмов цифровой обработки радиолокационной информации предполагает применение вычислительных средств повышенного быстродействия. Это, прежде всего, обусловлено использованием в радиолокации сложных алгоритмов обработки и необходимостью их выполнения в реальном масштабе времени (РМВ). Одно из основных направлений повышения быстродействия — сокращение времени выполнения операций. Проанализируем возможность уменьшения времени выполнения операции умножения.

Аппаратную реализацию операции умножения можно осуществить различными методами. Операция ускоренного умножения обычно включает три этапа [1; 2; 3]: формирование матрицы частичных произведений; преобразование матрицы частичных произведений в двухстрочный код; формирование кода произведения из двухстрочного кода. Основное время при выполнении этой операции затрачивается на реализацию второго этапа. В связи с этим внимание разработчиков сосредоточено на сокращении времени преобразования матрицы частичных произведений в двухстрочный код.

В работах [1; 2] описан быстрый «экономичный» метод преобразования матрицы частичных произведений в двухстрочный код. Это преобразование (неполное суммирование) занимает S шагов, число которых зависит от разрядности сомножителей. Время умножения $T_{ум} = T_И + ST_{SM} + T_{(2N-1)}$, где $T_И$ — задержка в элементе И; T_{SM} — время работы одноразрядного сумматора; $T_{(2N-1)}$ — задержка в $(2N-1)$-разрядном сверхпараллельном сумматоре; N — разрядность сомножителей.

Таким образом, время выполнения операции умножения определяется, с одной стороны, количеством шагов преобразования матрицы частичных произведений до двухстрочного кода, с другой стороны, временем работы сверхпараллельного сумматора.

В работе [3] разработан «модифицированный» метод повышения быстродействия устройства умножения в результате уменьшения требуемой разрядности сверхпараллельного сумматора. Это достигается изменением принципа формирования двухстрочного кода из матрицы частичных произведений. Однако такой принцип приводит к увеличению шагов преобразования.