

СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 502/504.064.3

ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО РЕШАТЕЛЯ

Доктор физ.-мат наук, профессор **В.Ф. Крапивин**¹,
кандидат техн. наук **И.И. Потанов**²,
кандидат физ.-мат. наук **В.Ю. Солдатов**¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова,
Российская академия наук, Москва, Российская Федерация.

E-mail: vkrpivin_36@mail.ru

²Всероссийский институт научной и технической информации,
Российская академия наук, Москва, Российская Федерация.

E-mail: ipotarov_37@mail.ru

PARALLEL-SQUENTIAL ALGORITHM FOR MULTI-CHANNEL DECISER

V.F. Kravivin, I.I. Potanov, V.Yu. Soldatov

Ключевые слова: радиометр, геофизический параметр, оптимизация, диагностика, принятие решения.

Key words: radiometer, geophysical parameter, optimization, diagnostics, decision making.

Предлагается схематическое решение обратной задачи радиометрии при дистанционном измерении геофизических параметров земной и водной поверхностей. Рассмотрена принципиальная схема многоканального решателя, обеспечивающего автоматическую настройку каналов на решаемую задачу. Аппаратно-программное обеспечение решателя основано на алгоритме интеллектуальной поддержки принятия решения, обеспечивающего оптимизацию структуры включаемых радиометров и минимизацию времени задержки принятия окончательного решения. Алгоритм принятия решения основан на процедуре обучения и эволюционного преодоления ситуаций информационной неопределенности, возникающих в условиях высокой не стационарности результатов измерений. Предложена параллельно-последовательная процедура принятия статистических решений. Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант РФФИ №16-01-00213-а).

Schematic solution of the radiometry inverse task for the remote measurement of land and water surface parameters is proposed. Principal scheme for the multi-channel solver is considered to be used as automatic device with adaptive functions to the solved task. Hardware and software package for the solver is based on the intellectual supporting algorithm of decision making providing the optimization of the structure of used radiometers and minimization of delay time for final decision. The decision making algorithm is based on the learning procedure and evolutionary overcoming the information uncertainty situations arising when measuring results have high nonstationarity. Parallel-sequential procedure for the statistical decisions is proposed.

1. Введение

Микроволновый диапазон электромагнитных волн широко используется при синтезе систем дистанционного зондирования как наземного, так и спутникового базирования. Сверхвысокочастотная радиометрия основывается на приеме собственного излучения объектов мониторинга, включая земные покровы, водоемы, атмосферу, облака и многие природно-антропогенные образования. Практические для исследований земных и водных объектов используется диапазон волн от 0,1 см до 30 см, а чаще всего, диапазон от 2 см до 21 см. [1,4,8]. Параметры, которые оказывают влияние на интенсивность и поляризацию излучения, включают диэлектрическую проницаемость, температуру, минерализацию, шероховатость земной и водной поверхностей, наличие над ними таких сред как растительные покровы, пенообразования и пленки нефтепродуктов.

Средства и методы дистанционного микроволнового зондирования при аэрокосмических наблюдениях наиболее активно начали развиваться последние 20 лет [4,8]. Причиной их внедрения явилась принципиально новая физическая информативность по сравнению со средствами, работающими в оптическом и инфракрасном диапазоне. Возможности оптических и инфракрасных методов сильно ограничиваются поглощающими и рассеивающими свойствами атмосферы. Поэтому очевидные достоинства микроволновой диагностики — возможность получения информации в любое время суток, широкий погодный диапазон, независимость от солнечного освещения. На сегодняшний день ни одна крупная спутниковая система по исследованию Земли не обходится без включения в нее пассивных и активных радиофизических приборов в той или иной конфигурации.

Как известно любое физическое тело создает естественное тепловое радиоизлучение, называемое радиотепловым излучением. Устройства, которые способны воспринимать и регистрировать излучение физических тел в микроволновом диапазоне, называются радиометрами. Системы микроволнового зондирования способны выполнять океанологические задачи, производить анализ температуры в различных слоях атмосферы, а также решать геофизические задачи: радиолокация земных покровов, мониторинг влажности почвы, мониторинг почв и растительных ресурсов, мониторинг процессов замерзания и оттаивания грунта и ледовых покровов.

В основе радиометрии земных покровов лежит способность радиоволн проникать под полог растительного покрова и в глубину почвенного слоя. Поэтому использование радиофизических методов позволяет оценивать состояние растительности и почвы и определять многие их характеристики. Дистанционное зондирование земных покровов основано на регистрации собственного или отраженного и рассеянного электромагнитного излучения. Возможность получения информации о свойствах земных покровов связана с тем, что характер собственного (теплого) излучения, механизмы рассеяния и отражения активных излучений являются функциями физических и геометрических свойств этих элементов. В теории теплового излучения при описании количественных соотношений используют спектральные и энергетические величины. Спектральные величины определяются по мощности, отнесенной к единице полосы частот, т.е. по спектральной плотности мощности. Энергетические величины определяются по суммарной мощности во всем частотном диапазоне излучения, т.е. энергетические величины получаются из спектральных величин путем интегрирования по частоте.

На практике при технической реализации и проведении радиометрических измерений обычно используют фиксированные частоты (длины волн), в результате чего создаются многоканальные информационно-измерительные системы, которые могут включать сенсоры оптического и инфракрасного диапазонов. Реально, создание таких систем требует разработки множества совместимых узлов и подсистем, а также разработки алгоритмов обработки многоканальной информации, включая решения обратных задач микроволновой радиометрии.

Одной из задач микроволновой радиометрии является выбор диапазонов волн для оснащения информационно-измерительных систем и решение обратной задачи при оценке характеристик земной поверхности по данным измерений с помощью радиометров в этих диапазонах. Поэтому в данной работе предлагается схемно-техническое решение этой задачи путем разработки многоканального саморегулируемого микроволнового устройства, позволяющего решать обратную задачу радиометрии.

2. Описание многоканального радиометрического устройства

Принципиальная схема многоканального радиометрического устройства представлена на рис. 1. Между выходами радиометров и соответствующими входами микропроцессора последовательно подключен n – канальный блок коммутации и n блоков вычисления дисперсии (рис. 2). На входах радиометров находятся переключатели, которые соединены через блок управления с первой группой выходов микропроцессора, а ко второй группе выходов микропроцессора подключен решающий блок, вторая группа входов которого соединена соответственно с выходами радиометров. Каждый из блоков вычисления дисперсии состоит из последовательно соединенных квантователей вычислителя среднего значения, делителя, сумматора и второго делителя. Выход квантователя соединен со вторым входом сумматора. Решающий блок (рис. 3) состоит из идентичных каналов, каждый из которых содержит сумматор, к n входам которого подключены n умножителей. Одни входы умножителей образуют первую группу входов решающего блока, а другие – вторую группу входов решающего блока.

В процессе измерений формируется множество рядов данных, с помощью которых необходимо установить корреляционные связи между параметрами изучаемого объекта и регистрируемыми радиояркими температурами. В любой момент времени t_i на выходе каждого радиометра фиксируются величины Z_{ij} ($i=1, \dots, M; j=1, \dots, n$) такие, что $Z_{ij} = T_j + \xi_{ij}$. Здесь T_j – реальное значение радиояркой температуры на длине волны λ_j , ξ_{ij} – шумовая составляющая. Поиск корреляции сводится к определению зависимости

$$T_j = f_j(X) \quad (1)$$

где $X = (x_1, \dots, x_m)$ – геофизические параметры, f – функция корреляции, устанавливаемая эмпирически или определяемая теоретически.

Существует множество приемов поиска функции f . Как правило, в качестве критерия согласия используется среднеквадратическое отклонение. Как показано в работе [4] наиболее эффективным является критерий минимизации дисперсионных характеристик шумовой составляющей в измерениях.

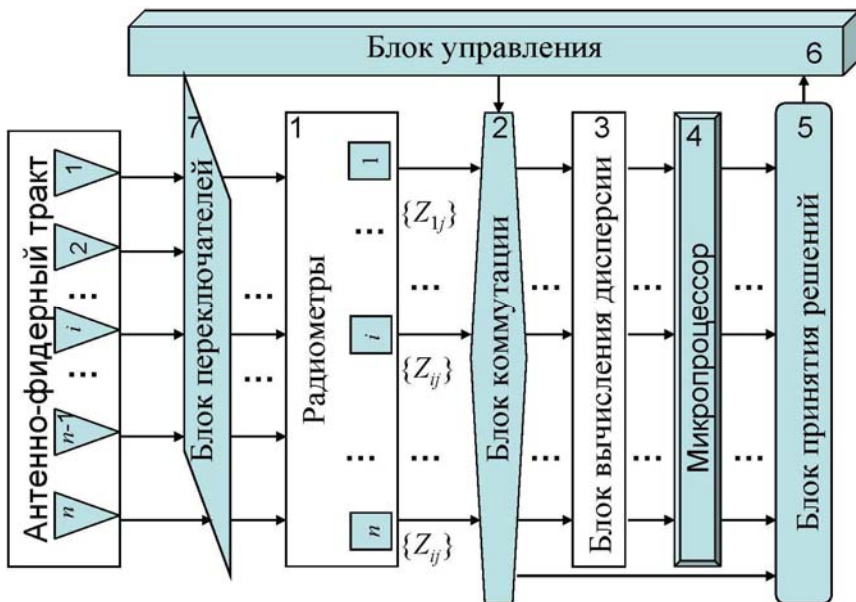


Рис. 1 Структурная схема устройства для измерения геофизических и гидрофизических параметров в режиме микроволнового мониторинга.

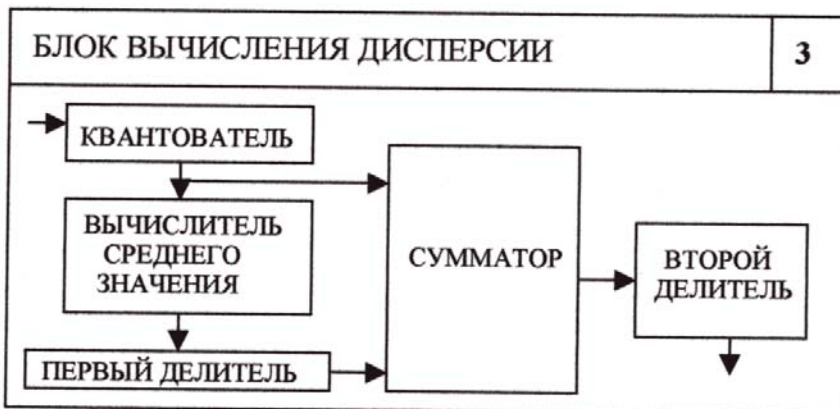


Рис. 2. Схема операций в блоке вычисления дисперсии.

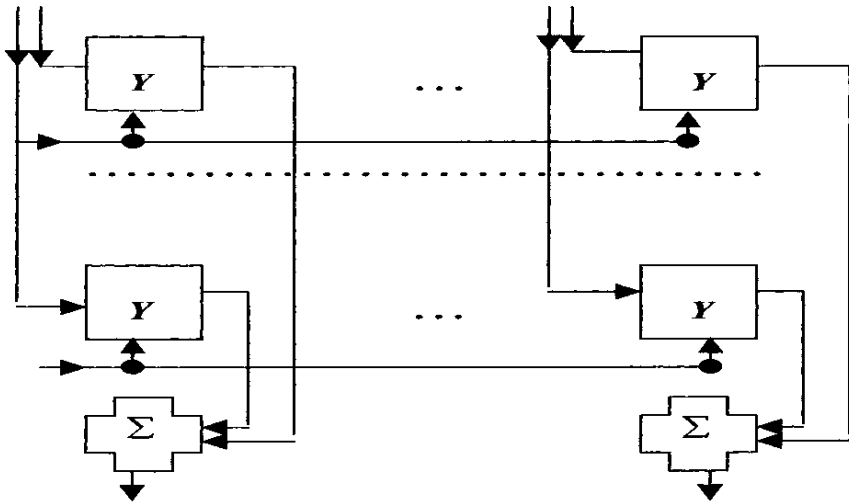


Рис. 3. Решающий блок. Обозначения: Y –умножитель, Σ –сумматор.

3. Алгоритмическое обеспечение многоканального устройства

Пусть функция (1) является линейной, и тогда имеем систему алгебраических уравнений:

$$\|A_{ij}\| X = T + \Xi \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m) \quad (2)$$

где матрица $\|A_{ij}\|$ характеризует зависимость яркостной температуры T_i ($i=1, \dots, n$) от геофизических параметров $X = (x_1, \dots, x_m)$, $\Xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)$.

Решение системы (2) находится из условия, что его дисперсия минимальна. Предполагается, что $\Xi = \{\xi_1, \dots, \xi_n\}$ имеет нулевое среднее и дисперсию $\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2\}$. Такое решение $\{x_1^*, \dots, x_m^*\}$ назовем σ -решением и его поиск реализуется следующей процедурой.

Умножим i -ое уравнение системы (2) последовательно на величины c_{1i}, \dots, c_{mi} ($i=1, \dots, m$) и потребуем

$$\sum_{i=1}^n c_{ji} A_{il} = \sigma_{jl}; \quad (3)$$

$$\delta_{jl} = \begin{cases} 1, & j = l; \\ 0, & j \neq l; \end{cases} \quad (l, j = 1, \dots, m) \quad (4)$$

При выполнении условий (3) и (4) находим

$$x_l^0 = \sum_{i=1}^n c_{li} T_i \quad (5)$$

Аналогичные соотношения записываются для x_j^0 ($j = 2, \dots, m$). Заменяя T на Z в (5), т.е. переходя к системе (2), получим:

$$\tilde{x}_1 = \sum_{i=1}^n c_{1i} (T_i + \xi_i) \quad (6)$$

Из (6) вычисляем дисперсию:

$$D[\tilde{x}_1] = \sum_{i=1}^n c_{1i}^2 \sigma_i^2 \quad (7)$$

Так как средние значения \tilde{x}_1 и x_1^0 совпадают по определению, то для решения поставленной задачи необходимо при соблюдении условий (4) найти минимум (7). Применим метод неопределенных множителей Лагранжа. Составим вспомогательное выражение:

$$\varphi(c_{11}, \dots, c_{1k}) = \sum_{i=1}^n c_{1i}^2 \sigma_i^2 + \mu_1 \left(\sum_{i=1}^n c_{1i} A_{i1} - 1 \right) + \sum_{j=2}^m \mu_j \sum_{i=1}^n c_{1i} A_{ij} \quad (8)$$

Приравнивая первые производные функции (8) к нулю получим:

$$2c_{1k} \sigma_k^2 + \sum_{j=1}^m \mu_j A_{kj} = 0 \quad (k = 1, \dots, n) \quad (9)$$

Соотношения (9) и условия (4) составляют систему $(m+n)$ уравнений, решение которых позволяет определить искомые оптимальные величины c_{ij}^* . Анализ показывает, что $D[x_j] = -\mu_j/2$. Величины μ_j находим из системы уравнений:

$$\sum_{j=1}^m \mu_j \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij} A_{i1}}{\sigma_i^2} = -2; \quad \sum_{j=1}^m \mu_j \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij} A_{il}}{\sigma_i^2} = 0; \quad l=2, \dots, m.$$

Численные оценки показывают, что σ - решение является предпочтительнее решения, полученного по критерию среднего квадратичного отклонения. Рассмотрим случай $m=2$ и $n=3$, где x_1 - термодинамическая температура, x_2 - степень минерализации. Из (6) имеем

$$c_{1k}^* = \frac{1}{\Delta \sigma_k^2} \left(A_{k1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i2}^2}{\sigma_i^2} - A_{k2} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1} A_{i2}}{\sigma_i^2} \right); \quad k = 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$c_{2k}^* = \frac{1}{\Delta \sigma_k^2} \left(A_{k2} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1}^2}{\sigma_i^2} - A_{k1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1} A_{i2}}{\sigma_i^2} \right); \quad k = 1, \dots, n; \quad (11)$$

где

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1}^2}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i2}^2}{\sigma_i^2} - \left(\sum_{i=1}^n \frac{A_{i1} A_{i2}}{\sigma_i^2} \right)^2$$

Оптимальная оценка x_j^* определится соотношением

$$x_j^* = \sum_{i=1}^n c_{ji}^* Z_i \quad (j=1,2)$$

Дисперсия оценки x_j^* имеет значение

$$D[x_1^*] = \Delta^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i2}^2}{\sigma_i^2}; \quad D[x_2^*] = \Delta^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{A_{i1}^2}{\sigma_i^2} \quad (12)$$

Сравним на конкретном примере эту оценку с оценкой по методу наименьших квадратов. Пусть

$$\|A_{ij}\| = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \\ 1 & 3 \end{vmatrix}$$

Тогда из формул (12) получаем

$$\begin{aligned} c_{11}^* &= (6\sigma_2^{22} + 2\sigma_3) / \Delta_1; c_{12}^* = (3\sigma_1^2 - \sigma_3^2) / \Delta_1; \\ c_{13}^* &= -2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) / \Delta_1; c_{21}^* = -(2\sigma_2^2 + \sigma_3^2) / \Delta_1; \\ c_{22}^* &= (-\sigma_1^2 + \sigma_3^2) / \Delta_1; c_{23}^* = -(\sigma_1^2 + 2\sigma_2^2) / \Delta_1 \end{aligned}$$

где $\Delta_1 = \sigma_1^2 + 4\sigma_2^2 + \sigma_3^2$.

Далее имеем

$$D[x_1^*] = (9\sigma_1^2\sigma_2^2 + 4\sigma_1^2\sigma_3^2 + \sigma_2^2\sigma_3^2) / \Delta_1; \quad D[x_2^*] = (\sigma_1^2\sigma_2^2 + \sigma_1^2\sigma_3^2 + \sigma_2^2\sigma_3^2) / \Delta_1$$

Пусть \hat{x}_1 и \hat{x}_2 являются оценками параметров x_1 и x_2 , полученные по методу наименьших квадратов, т.е. они являются решениями задачи минимизации

$$\min_{x_1, x_2} \left(\sum_{i=1}^n (T_i + \xi_i - A_{i1}x_1 - A_{i2}x_2)^2 \right)^{1/2} = \left(\sum_{i=1}^n (T_i + \xi_i - A_{i1}\hat{x}_1 - A_{i2}\hat{x}_2)^2 \right)^{1/2}$$

Имеем

$$\hat{x}_1 = 4(T_1 + \xi_1)/3 + (T_2 + \xi_2)/3 - 2(T_3 + \xi_3), \quad \hat{x}_2 = -(T_1 + \xi_1)/2 + (T_3 + \xi_3)/2$$

$$D[\hat{x}_1] = (16\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 4\sigma_3^2) / 9; \quad D[\hat{x}_2] = (\sigma_1^2 + \sigma_3^2) / 4$$

Легко видеть, что $D[\hat{x}_1] \geq D[x_1^*]$ и $D[\hat{x}_2] \geq D[x_2^*]$. Следовательно, σ - решение предпочтительнее оценок, получаемых по методу наименьших квадратов.

Структурная схема устройства для измерения геофизических параметров включает блок вычисления дисперсии и решающий блок, которые работают следующим образом. При калибровке радиометров 1 сигналы Z_{ij} с их выходов через многоканальный блок 2 коммутации поступают в блоки 3 вычислителя дисперсии. При этом антенно-фидерный тракт (АФТ) отключен от радиометров. В блоке 3 вычисления дисперсии осуществляются по алгоритму:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (Z_{ij} - M_j), \quad M_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Z_{ij}$$

Величины M_j вычисляются в блоке расчета среднего. Сумматор вычисляет: $\sum_{i=1}^M (Z_{ij} - M_j)$. Вычисленные значения σ_j^2 поступают в микропроцессор 4 и используются для вычисления коэффициентов c_{ji} . С первой группы выходов микропроцессора эти коэффициенты поступают в решающий блок 5, где используются для решения системы уравнений, а со второй группы выходов – на блок 6 управления, который формирует сигнал, отключающий радиометры 1, для которых парциальные коэффициенты равны или близки к нулю, т.е. автоматически происходит исключение мало информационных каналов и одновременное сжатие системы решаемых уравнений. Этот шаг позволяет сократить не только объем вычислений, но и повысить точность определения параметров объекта. После определения дисперсий блок коммутации 2 блокирует поступление данных от неинформативных каналов. Данные от информативных каналов поступают в решающий блок 5. Выходной сигнал умножителя соответствует значению одного из оцениваемых параметров.

Рассмотренный алгоритм базируется на подходе к решению обратной задачи микроволнового мониторинга, основанного на предположении о линейной функциональной корреляции между радиояркими контрастами и характеристиками объекта мониторинга. Поиск аналитических соотношений, связывающих радиояркую температуру среды с ее термодинамическими и электрофизическими характеристиками, охватывает, безусловно, более общие классы функциональных моделей. Наиболее общая форма такой зависимости имеет вид:

$$T_i = \kappa_i \int_0^{\infty} T(h) \gamma_i(h) \exp \left[-\int_0^h \gamma_i(x) dx \right] dh, \quad (13)$$

где $T(h)$ – термодинамический профиль среды, T_i – радиояркая температура на частоте ν_i , $\gamma_i(h)$ – профиль коэффициента поглощения среды, κ_i – излучательная способность среды.

Соотношение (13) позволяет по $T(h)$ и $\gamma_i(h)$ находить T_i (прямая задача) и по T_i рассчитывать $T(h)$ и $\gamma_i(h)$ (обратная задача). Предлагаемый метод решения этих задач основан на использовании значений $T(h)$ и $\gamma_i(h)$ и их производных в точке $h=0$ при некоторых дополнительных ограничениях, вытекающих из существования проводимых ниже преобразований. Представим соотношение (13) в виде:

$$T_\lambda = -\kappa_\lambda \int_0^\infty T(h) dF_\lambda(h), \quad (14)$$

где

$$F_\lambda(h) = \exp \left[-\int_0^h \gamma_\lambda(x) dx \right]$$

λ - длина волны.

Интегрируя (14) по частям, получаем:

$$T_\lambda = \kappa_\lambda \left[T_0 + \int_0^\infty T'(h) F_\lambda(h) dh \right] = \kappa_\lambda [T_0 + J_1] \quad (15)$$

Пусть $J_1=0$, тогда $T_\lambda = \kappa_\lambda T_0$. Если $dT(h)/dh=0$, то $J_1=0$. Поэтому найдем условия, при которых $J_1=0$. Пусть выполняются соотношения:

$$\gamma_\lambda(h) \equiv c_\lambda > 0, \quad T(h) = \sum_{k=0}^n B_k h^k \quad (16)$$

Из (16) следует, что если коэффициенты B_k удовлетворяют условию:

$$\sum_{k=1}^n k! \frac{B_k}{c_\lambda^k} = 0, \quad (17)$$

то $J_1=0$.

Проинтегрировав (17) по частям, получаем:

$$T_\lambda = \kappa_\lambda \left[T_0 + \frac{T'_0}{\gamma_\lambda(0)} + \int_0^\infty \frac{T''(h)\gamma_\lambda(h) - \gamma'_\lambda(h)T'(h)}{\gamma_\lambda^2(h)} F_\lambda(h) dh \right] \quad (18)$$

Приравниваем нулю интеграл в (18). Это дает

$$T(h) = c \int \gamma_\lambda(h) dh,$$

где c – произвольная константа. Интеграл в (18) будет равен нулю, если

$$\sum_{k=2}^n B_k k(k-1)k! c_\lambda^{1-k} = 0 \quad (19)$$

Дальнейшее интегрирование (18) по частям дает:

$$T_\lambda = \kappa_\lambda \left[T_0 + \frac{T'_0}{\gamma_\lambda(0)} + \left(\frac{T'}{\gamma_\lambda(h)} \right)' \frac{1}{\gamma_\lambda(h)} \Big|_{h=0} + J_3 \right],$$

где обозначено

$$J_3 = \int_0^{\infty} \frac{T'''(h)\gamma_\lambda(h) - 3T''(h)\gamma_\lambda'(h) - T'(h)\gamma_\lambda''(h) + 3T'(h)[\gamma_\lambda']^2}{\gamma_\lambda^4} F_\lambda(h) dh$$

Этот интеграл будет равен нулю при

$$T(h) = c \int \gamma_\lambda(h) \int \gamma_\lambda(u) du dh$$

Если же условие (16) выполняется, то $J_3 = 0$ при

$$\sum_{k=3}^n B_k k(k-1)(k-2)k! c_\lambda^{2-k} = 0$$

Если процесс интегрирования (18) продолжить N раз, то

$$T_\lambda = \kappa_\lambda \left[\sum_{k=1}^N P_k(0) + \int_0^{\infty} P'_N(h) F_\lambda(h) dh \right], \quad (20)$$

где

$$P_1(h) = T(h), \quad P_2(h) = T'(h) / \gamma_\lambda(h), \dots, \quad P_k(h) = P'_{k-1}(h) / \gamma_\lambda(h).$$

Но

$$J_N = \int_0^{\infty} P'_N(h) F_\lambda(h) dh = 0$$

при

$$\sum_{k=N}^n B_k k(k-1) \dots (k-N+1) k! c_\lambda^{N-1-k} = 0, \quad (n > N)$$

Рассмотрим случай, когда

$$\gamma_\lambda(h) = \exp\{c_\lambda h\}$$

Из (20) получаем:

$$T(h) = \sum_{k=0}^{N-1} B_k \exp[kc_\lambda h]$$

Перейдем к решению обратной задачи. Пусть измерения произведены на длинах волн $\lambda_1, \dots, \lambda_n$. Решаем уравнение:

$$P'_{N-1}(h) = c\gamma_\lambda(h)$$

и находим

$$P_{k-1}(h) = \int \gamma_\lambda(h) P_k(h) dh \quad (k = 1, \dots, n)$$

Пусть $\gamma_\lambda(h)=\varphi(\lambda)\psi(h)$, т.е. зависимость коэффициента поглощения от частоты и глубины слоя разделяется на произведение известной функции $\varphi(\lambda)$ и неизвестной функции $\psi(h)$. Как правило, функция $\varphi(\lambda)$ задается эмпирической таблицей и может быть построена ее аналитическая аппроксимация. Тогда, отбрасывая в (20) второй член справа (он равен нулю), запишем соотношение:

$$T_\lambda = \kappa_\lambda \sum_{k=1}^n T^{(k-1)}(0) F_k \left[\varphi(\lambda), \psi^{(N-k-1)}(0), \dots, \psi'(0), \psi(0) \right] \quad (21)$$

и решение обратной задачи сводится к решению системы алгебраических уравнений относительно функций

$$T(0), T'(0), \dots, T^{(n-1)}(0), \psi(0), \dots, \psi^{(n-1)}(0)$$

Рассмотрим случай $\psi(h)=\text{const}$, т.е. $\gamma_\lambda=\varphi(\lambda) > 0$. Уравнение (21) переписывается в виде:

$$T_\lambda = \kappa_\lambda \sum_{k=1}^n T^{(k-1)}(0) / \varphi^{(k-1)}(\lambda) \quad (22)$$

В простейшем варианте, если T_λ измерялось на n различных длинах волн $\{\lambda_i; i=1, \dots, n\}$, то определитель системы (22) равен:

$$\Delta = \prod_{i=1}^n \kappa_i \prod_{i>k}^n [\varphi(\lambda_i) - \varphi(\lambda_k)] / [\varphi(\lambda_i)\varphi(\lambda_k)]$$

Если $\varphi(\lambda_i) \neq \varphi(\lambda_k)$ ни при каких сочетаниях $i \neq k$, то $\Delta \neq 0$ и система (22) имеет единственное решение. Пусть теперь

$$\psi(h) = h^m,$$

тогда из (20) следует, что

$$T(h) = \sum_{k=0}^{n-1} B_k h^{k(m+1)}$$

и получаем систему алгебраических уравнений

$$P_k(0) = \binom{m}{m+1} [k-1]! \dots! b_{k-1} / \varphi^{k-1}(\lambda)$$

с определителем, равным

$$\Delta = \prod_{i=1}^n \kappa_i \prod_{p=1}^n [m(k-1)]^{n+1-p} \prod_{i>k}^n [\varphi(\lambda_i) - \varphi(\lambda_k)] / [\varphi(\lambda_i)\varphi(\lambda_k)]$$

Аналогично рассматривается случай, когда функция ψ аппроксимируется многочленом.

Изложенная процедура позволяет поставить задачу модернизации предложенного устройства путем введения нелинейных элементов преобразования сигналов радиометров. Это может быть реализовано на элементной базе современной микроэлектроники.

4. Параллельно-последовательная процедура принятия статистических решений

Многоканальное микроволновое устройство может быть размещено на стационарном или мобильном носителе [1,4,8]. В зависимости от этого в блоке принятия решений 5 используется соответствующая ситуации процедура обработки данных измерений. Схематически эта процедура представлена на схеме рис. 4.

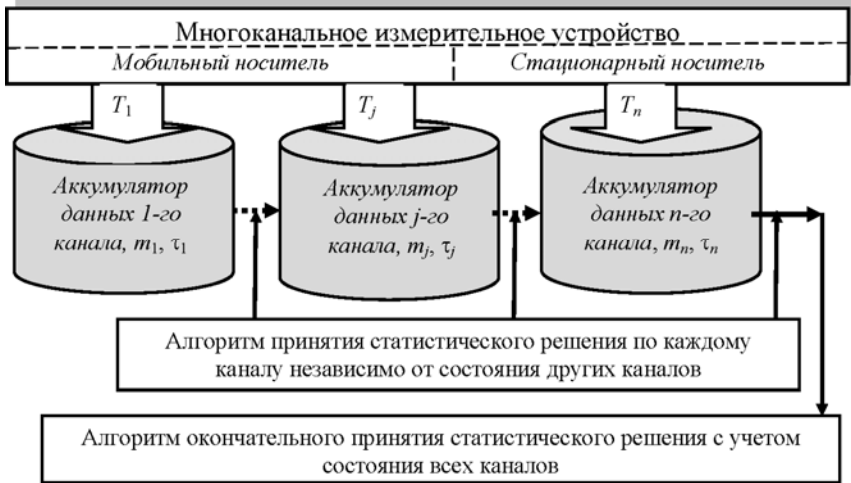


Рис. 4. Схема реализации параллельно-последовательной процедуры принятия статистических решений. Обозначения: m_j и τ_j – объем и время задержки по j -му каналу, соответственно.

Поток данных $\{T_i, i=1, \dots, n\}$ может анализироваться параллельно независимо по каждому каналу λ_i ($i=1, \dots, n$) и по совокупности части или всех каналов. Это обеспечивает оперативность принятия окончательного решения о значениях геофизических параметров и исключает возможность потери информации в случае, если скорость перемещения носителя устройства превышает скорость принятия решений. В этом случае согласно схеме рис. 4 возникает временная задержка данных измерений. Объем задерживаемых данных хранится в буферах, откуда изымается в соответствии с алгоритмом принятия статистического решения [2,3,5-7].

5. Заключение

Рассмотренная здесь функциональная схема многоканального устройства для измерения геофизических параметров при соответствующем подборе элементной базы может быть исполнена в виде блока микроволновой системы мониторинга, который будет обеспечивать регулирование весовых коэффициентов каналов. Теоретическая избыточность такого устройства дает значительный выигрыш в точности получаемых результатов и исключает необходимость спектральной настройки системы мониторинга.

Спектральная радиояркая картина геофизических объектов достаточно сложна. Как правило, практический выбор спектрального диапазона при конкретных измерениях ограничивается одним значением частоты, определяемой в основном эмпирически. Такой опыт продиктован как экономическими, так и техническими ограничениями. Но при этом всегда возникает проблема целесообразного сбалансированного выбора радиометрической частоты с учетом стоимости измерений и желаемого результата. Предложенное здесь устройство обеспечивает полную автоматизацию процедуры геофизического мониторинга.

Литература (References)

1. Haarbrink R., Krapivin V.F., Krisilov A., Krisilov V., Novichikhin E.P., Shutko A.M., Sidorov I. Intelligent data processing in global monitoring and security. Sofia: ITHEA, 2011. 410 pp.
2. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Phillips G.W. Global environmental change: Modelling and Monitoring. Berlin: Springer-Verlag, 2002. 319 pp.
3. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P., Varotsos C.A. Global Ecodynamics: A Multidimensional Analysis. Chichester U.K.: Springer/PRAxis, 2004. 658 pp.
4. Krapivin V.F., Shutko A.M. Information technologies for remote monitoring of the environment. Chichester U.K.: Springer/Praxis, 2012. 498 pp.
5. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making. London: Springer, 2015. 903 pp.
6. Nitu C., Krapivin V.F., Bruno A. Intelligent techniques in ecology. Bucharest: Printech, 2000. - 150 pp.
7. Nitu C., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. Information-Modeling Technology for Environmental Investigations. Bucharest: Matrix Rom, 2013. 621 pp.
8. Shutko A.M., Krapivin V.F., Haarbrink R.B., Sidorov I.A., Novichikhin E.P., Archer F., Krisilov A.D. Practical microwave radiometric risk assessment. Sofia: Professor Marin Drinov Academic Publishing House, 2010. 88 pp.