

УДК 528.8:519.852.3

ОПТИМИЗАЦИЯ СУБПИКСЕЛЬНОГО МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Р. М. Керимов

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджан, Karimov.ruslan@hotmail.com

Проанализирована существующая необходимость проведения субпиксельного анализа потоков радиации, поступающих на спектрорадиометр AVHRR, используемого в целях раннего обнаружения возгораний лесов. Предложено использование метода Дозиера в новой модификации – с ненормированными весовыми коэффициентами для вычисления оптимальных нормированных весовых коэффициентов применительно к трехволновым измерениям в базе *MIR* диапазоне с учетом ограничений, задаваемых на базе экспертных знаний. Показано, что примененные метода линейного программирования, где ограничительные условия формируются на базе результатов измерений в *MIR* диапазоне, а целевая функция на базе результатов измерений в *TIR* диапазоне позволяет вычислить как ненормированные, так и нормированные весовые коэффициенты, а также соответствующие скорректированные значения ограничительных оценок. При этом каждый набор исходных ограничительных оценок и ненормированных весовых коэффициентов позволяет получить соответствующий вариант оптимального решения, включающий значения нормированных весовых коэффициентов и нормированных ограничительных оценок. Из множества таких вариантов на базе экспертных знаний выбирается наилучший вариант.

Ключевые слова: оптимизация, дистанционное зондирование, субпиксельный анализ, спектрорадиометр, пространственное разрешение, линейное программирование.

OPTIMISATION OF SUBPIXEL MULTISPECTRAL REMOTE PROBING USING LINEAR PROGRAMMING

R. M. Kerimov

Azerbaijan National Aerospace Agency, Baku, Karimov.ruslan@hotmail.com

The article analyzes the existing need for sub-pixel analysis of the radiation fluxes received by the spectroradiometer AVHRR, used for early detection of forest fires. It proposes the use of new Dozier method modification - using non-normalized weights to calculate the optimal weighting coefficients with respect to the three-wave measurements on the basis of *MIR* range within the constraints specified on the basis of expertise. The article shows that the use of linear programming method, where restrictive conditions are formed on the basis of the measurement results in *MIR* diapason and objective function on the basis of the measurement results in *TIR* band, allows us to calculate non-normalized and normalized weights and corresponding adjusted values of restrictive ratings. Each set of raw non-normalized estimates and restrictive weighting coefficients allows to obtain optimal solutions corresponding version comprising the normalized values and the weighting coefficients and normalized restrictive ratings. Of many options the best is selected on the basis of expertise.

Keywords: optimization, remote sensing, subpixel analysis, spectroradiometer, spatial resolution, linear programming.

Хорошо известно, что размер пикселя является основным параметром, характеризующим пространственное разрешение при дистанционном зондировании. Следует отметить, что пространственное разрешение также часто определяется наземной дистанцией взятия выборок, определяемой расстоянием между соседними пикселями. Необходимость в раннем обнаружении мелкомасштабных аномалий в исследуемом поле на поверхности Земли диктует необходимость проведения субпиксельного анализа спутниковой информации. В настоящей статье будет показана важность проведения субпиксельного анализа изображений в такой важной сфере приложения техники дистанционного зондирования как обнаружение лесных пожаров на примере спектрорадиометра AVHRR используемого в этих целях [1-3]. Данные AVHRR позволяют выработать информацию двух типов:

1. Карты обнаруженных «горячих» точек с использованием термального канала;
2. Картирование послепожарных сгоревших участков с использованием нескольких каналов среднего ИК диапазона.

Также известны гибридные алгоритмы зондирования, когда ставится задача составления совмещенных карт.

Однако, спектро радиометр AVHRR не является прибором, идеально предназначенным для обнаружения лесных пожаров. Дело в том, что термальные каналы в дневное время подвергаются влиянию отраженной солнечной радиации, а фотоприемники термальных каналов быстро входят в насыщение. Все это приводит к невозможности использования AVHRR для обнаружения и картирования больших лесных пожаров.

Как отмечено в работе [4], процесс картирования сгоревших участков осуществляется в многошаговом порядке, в котором вначале используется алгоритм обнаружения активного огня, далее создается полигон примыкающих сгоревших зон и осуществляется картирование обуглившихся участков.

Алгоритм обнаружения активного огня был разработан с использованием законов теории вероятностей для определения пикселя отображающего участки охваченные огнем. Процесс картирования таких участков основывается на вычислении вероятности того, что огонь достоверно распознан. При этом используется формула умножения вероятностей

$$P_p = P_{\Pi} \cdot P_{\text{об.п.}}, \quad (1)$$

где: P_p – вероятность достоверного распознавания пожара; P_{Π} – вероятность возникновения пожара; $P_{\text{об.п.}}$ – вероятность обнаружения пожара.

Отметим, что $P_{\text{об.п.}}$ является функцией таких показателей спектро радиометра как чувствительность, инерционность; время прохождения борта через участок, затенение горящих участков кронами деревьев, а также атмосферные условия прохождения радиационного излучения.

Как отмечается в работе [5, 6], лесные пожары являются случайными процессами, так как их возникновение зависит от множества факторов, таких как поверхностная влага, влажность воздуха, наличие источников огня и т.д. Обнаружение полезного сигнала на фоне шумового сигнала подчиняется эмпирически установленному экспоненциальному закону

$$P_{\text{об.п.}} = 1 - e^{\{-0,15(\psi-1)^2\}}, \quad (2)$$

где: ψ – отношение сигнал/шум, определяемое как $\psi = \frac{S}{N}$; где S – интенсивность полезного сигнала; N – интенсивность шумов.

Следует отметить, что величина ψ зависит от показателей инфракрасного сенсора системы, атмосферных условий, интенсивности огня, структуры леса и т.д.

С учетом вышесказанного использование AVHRR в качестве основного исследовательского инструмента для раннего дистанционного обнаружения лесных пожаров выдвигает на первый план проведения субпиксельных исследований на базе метода Дозиера [8]. Данный метод позволяет установить температуру огня, а также часть участка, охваченной пожаром. В принципе, этот метод может быть применен к данным любого спектро радиометра. Согласно этому методу, если внутренняя часть участка (относительным размером p) охвачен огнем с температурой T_p , а внешняя часть участка с площадью $1 - p$ без огня имеет поверхностную температуру T_{surf} то потоки радиации, регистрируемые спектро радиометром в диапазоне MIR (средний ИК диапазон) и TIR (термальный ИК) могут быть определены по формуле [7].

$$L_{MIR} = p \cdot B(\lambda_{MIR}, T_f) + (1 - p) \cdot B(\lambda_{MIR}, T_{surf}), \quad (3)$$

$$L_{TIR} = p \cdot B(\lambda_{TIR}, T_f) + (1 - p) \cdot B(\lambda_{TIR}, T_{surf}), \quad (4)$$

где: L_{MIR} и L_{TIR} – радиации, измеряемые с помощью сенсора на спектральных диапазонах 3,7 мкм и 11 мкм; $B(\lambda, T)$ – функция Планка.

Система уравнения (3) и (4) позволяет вычислить температуру огня и значение параметра p . Метод Дозиера, выраженный в уравнениях (3), (4) имеет следующие недостатки:

- не учет солнечной отраженной радиации;
- не учет негомогенности участка;

- не учет влияния атмосферы;
- осложнение вычислений при проведении измерений на 3-х и более диапазонах длин волн;
- невозможность определения приоритетности TIR диапазона в отличие от MIR диапазона, в котором возможны влияния отраженной радиации Солнца.

С учетом вышеуказанного, далее, в настоящей статье предлагается метод ненормированных весовых коэффициентов позволяющий оптимизировать весь процесс дистанционного обнаружения горящих субпиксельных участков лесов. Оптимизация осуществляется с целью определения оптимальной величины p при которой при заданных ограничениях λ_{MIRi} ; $i = \overline{1, n}$ на L_{TIR} достиг бы максимальной величины. При этом измерения в диапазоне MIR проводится в нескольких точках $\lambda_{1,MIR}, \lambda_{2,MIR}, \dots, \lambda_{n,MIR}$.

Вышеизложенное позволяет применить метод линейного программирования для оптимизации процесса раннего обнаружения возгорания лесов. Ограничительные условия формируются на базе уравнения (3), с учетом ненормированных весовых коэффициентов p_1 и p_2 применительно к результатам спектрометрических измерений на трех длинах волн $\lambda_{1,MIR}$; $\lambda_{2,MIR}$; $\lambda_{3,MIR}$. При этом выставляются условия

$$L_{1MIR} > C_1 : C_1 = const, \tag{5}$$

$$L_{2MIR} > C_2 : C_2 = const, \tag{6}$$

$$L_{3MIR} > C_3 : C_3 = const. \tag{7}$$

С учетом выражений (3) и (5) - (7) имеем

$$p_1 \cdot B(\lambda_{1MIR}, T_f) + p_2 \cdot B(\lambda_{1MIR}, T_{surf}) \geq C_1, \tag{8}$$

$$p_1 \cdot B(\lambda_{2MIR}, T_f) + p_2 \cdot B(\lambda_{2MIR}, T_{surf}) \geq C_2 \tag{9}$$

$$p_1 \cdot B(\lambda_{3MIR}, T_f) + p_2 \cdot B(\lambda_{3MIR}, T_{surf}) \geq C_3, \tag{10}$$

где p_1 и p_2 ненормированные весовые функции, подлежащие поиску.

Так как в диапазоне длин волн TIR из-за отсутствия влияния отраженной солнечной радиации достоверность результата измерений намного выше, чем в MIR, то в качестве цели можно выбрать условия максимизации величины L_{TIR} , т.е. функционал цели формируется как

$$F = p_1 B(\lambda_{TIR}, T_f) + p_2 B(\lambda_{TIR}, T_{surf}) \rightarrow (\max_1). \tag{11}$$

Условное графическое решение задачи линейного программирования дано на рис.1.

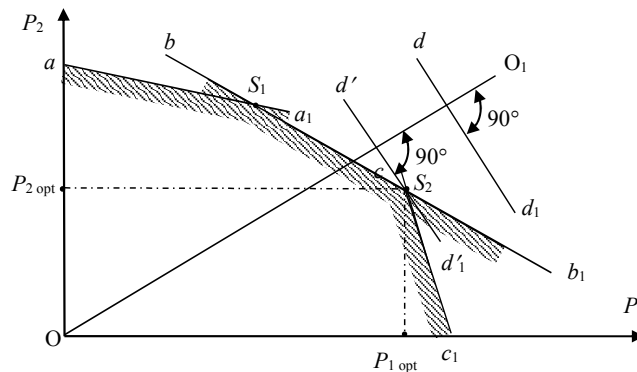


Рис. 1. Графическое решение оптимизационной задачи. Принятые обозначения: aa_1 - отрезок линии соответствующий условию (8); bb_1 - отрезок линии соответствующий условию (9); cc_1 - отрезок линии соответствующий условию (10); OO_1 - линия, соответствующая функции (11) при $F = 0$; dd_1 - основание опорной плоскости; $d'd_1'$ - смещенная позиция dd_1 ; S_1 и S_2 узловые точки; P_{1opt} и P_{2opt} - оптимальные значения P_1 и P_2 .

Очевидно, что вычисленные значения $P_{1.opt}$ и $P_{2.opt}$ являются ненормированными весовыми коэффициентами. Для перехода к нормированным весовым коэффициентам вычисляются новые нормированные весовые коэффициенты $P_{1.n.opt}$ и $P_{2.n.opt}$ по формулам

$$P_{1.n.opt} = \frac{P_{1.opt}}{P_{1.opt} + P_{2.opt}}, \quad (12)$$

$$P_{2.n.opt} = \frac{P_{2.opt}}{P_{1.opt} + P_{2.opt}}. \quad (13)$$

С учетом (8) – (10) и (12) и (13) получим

$$P_{1.n.opt} \cdot B(\lambda_{1MIR}, T_f) + P_{2.n.opt} \cdot B(\lambda_{1MIR}, T_{surf}) \geq \frac{C_1}{P_{1.opt} + P_{2.opt}} = C_{1n}, \quad (14)$$

$$P_{1.n.opt} \cdot B(\lambda_{2MIR}, T_f) + P_{2.n.opt} \cdot B(\lambda_{2MIR}, T_{surf}) \geq \frac{C_2}{P_{1.opt} + P_{2.opt}} = C_{2n}, \quad (15)$$

$$P_{1.n.opt} \cdot B(\lambda_{3MIR}, T_f) + P_{2.n.opt} \cdot B(\lambda_{3MIR}, T_{surf}) \geq \frac{C_3}{P_{1.opt} + P_{2.opt}} = C_{3n}. \quad (16)$$

Соответственно вышеизложенному целевая функция может быть вычислена как

$$F_1 = P_{1.n.opt} \cdot B(\lambda_{TIR}, T_f) + P_{2.n.opt} \cdot B(\lambda_{TIR}, T_{surf}) \rightarrow (\max_2), \quad (17)$$

где

$$(\max_2) = \frac{(\max_1)}{P_{1.opt} + P_{2.opt}}. \quad (18)$$

Таким образом, предложенный в настоящей статье метод ненормированных коэффициентов субпиксельной обработки измеряемых радиационных потоков может быть изложен в следующей алгоритмической последовательности.

1. Выбираются три длины волн в диапазоне MIR.
2. На базе экспертных знаний определяются ограничения, выраженные постоянными C_1, C_2, C_3 с учетом ненормированности весовых коэффициентов p_1 и p_2 .
3. Решается задача линейного программирования. Определяется значение $P_{1.opt}$ и $P_{2.opt}$.
4. Осуществляется переход от ненормированных значений весовых функций к нормированным весовым коэффициентам $P_{1.n.opt}$ и $P_{2.n.opt}$.
5. Вычисляются показатели ограничений C_{1n}, C_{2n} и C_{3n} .
6. Вычисляется максимум, достигаемый при переходе на нормированные коэффициенты по формуле (18).

Следует отметить, что основное преимущество предложенного метода заключается в возможности проведения оптимизации при отсутствии четких знаний о нормированных весовых коэффициентах и соответствующих ограничительных условиях. Проводя вышеописанную процедуру ненормированной оптимизации можно получить множество оптимальных решений, окончательный выбор из которых может быть осуществлен с учетом накопленных экспертных знаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barbosa P. M., Gregoire J. M., Pereira J. M. C. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at scale // Remote Sensing of Environment. 1999. September. Vol. 69.
2. Cahoon Jr. D. R., Stocks B. J., Levine J. S., Coffey III W. R., Chung C. C. Evaluation of a technique for satellite-derived area estimation of forest fires // Journal of Geophysical Research. 1992. Vol. 97. P. 3805–3814.
3. Cahoon Jr. D. R., Levine J. S., Coffey III W. R., Stocks B. J. The extent of burning in African savannas // Advances in Space Research. 1994. Vol. 14. P. 447–454.
4. Sukhinin A. I., French N. H. F., Kasischke E. S., et al. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 93. P. 546–564.

5. Lloyd I. M. Thermal imaging system New York Plenum Press. New York : Plenum Press, 1975. 456 p.
6. Rosell F. A., Wilson R. H. Ch.5. Recent physical experiments and the display signal-to-noise ratio concept. New York : Plenum Press, 1973.
7. Abel C., Casanova J. L. Forest Fires and Remote Sensing. <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/27171.pdf>.
8. Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution // Remote Sensing of Environment. 1981. Vol. 11. P. 221–229.