

УДК 631.4
Г. Р. г. Бабаева

Формирование новых экстремальных показателей содержания влаги в почве

Национальное аэрокосмическое агентство, г.Баку,
Азербайджанская Республика
e-mail: asadzade@rambler.ru

Аннотация. Проанализирована возможность введения новых экстремальных показателей содержания влаги в почве. Сформирован новый показатель влажности почвы. Предлагаемый показатель базируется на ранее известном двухволновой скалярной свертки логарифмов коэффициентов отражения почвы в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах с весовыми коэффициентами в виде функций соответствующих длин волн. Доказан экстремальный характер вновь введенного показателя, применительно к некоторому подклассу функций зависимости сигнала отражения в ближнем инфракрасном диапазоне от сигнала отражения в видимом диапазоне. Показано, что максимум предлагаемого показателя возникает при наличии линейной зависимости между указанными функциями.

Ключевые слова: почва, влажность, спектр отражения, свертка, функционал

Введение

Содержание влаги в почве можно интерпретировать как временное хранение воды в неглубоком слое верхней поверхности Земли по сравнению с общим количеством воды в глобальном масштабе. Этот показатель важен при исследовании агрономических, гидрологических и метеорологических процессов разного масштаба, например, при оценке и прогнозировании наводнений, эрозионных процессов, других природных бедствий. Влажность почвы может быть определена контактными и дистанционными методами. К контактным методам могут быть отнесены гравиметрические, нейтронные, рефлектометрические, емкостные, тензометрические и гигрометрические способы определения содержания влаги в почве [1–6]. Вместе с тем, контактные методы трудоемки и требуют значительных материальных и трудовых затрат. В отличие от них, методы дистанционного зондирования, основанные на отражательных характеристиках влажной почвы позволяют избежать указанных недостатков [7–8]. Обзор указанных методов был приведен в работе [9], в которой рассматривались проблемы измерения влаги в почве с точки зрения исследования экологии и гидрологии в масштабе бассейнов гидрообъектов.

Вместе с тем, с развитием дистанционных методов важность и значимость контактных методов ничуть не снижается. Дело в том, что любая бортовая информация, полученная от удаленных летательных объектов, оснащенных дистанционным измерительным оборудованием, должна быть подтверждена путем реализации таких стандартных процедур как калибровка и валидация, для выполнения которых используются контактные методы измерений.

С физической точки зрения, спектральные методы измерения влажности почвы наиболее широко распространены. Это, в частности, объясняется тем, что

спектральные методы используется как при дистанционных, так и при контактных измерениях. Особую группу здесь составляют проксимальные методы спектральных измерителей, в которых влияние атмосферы на результат измерений почти отсутствует [10]. В спектральных методах определения влажности почвы в основном используются отражательные спектры почвы, наиболее информативными которых являются ближне-инфракрасные (NIR) и среднеинфракрасные участки спектра. Например, в работе [11] сообщается о разработке двух-волнового сенсора, работающего на длинах волн 1,94 мкм и 1,8 мкм где, на первой имеется сильная линия поглощения влаги, а на второй поглощение незначительно. Совместная обработка сигналов указанных каналов позволяет вычислить содержание влаги в почве.

Анализ существующих методов определения содержания влаги в почве с использованием отражательных спектров в почве показывает, что результат этих исследований обычно представляются в качестве следующей функции:

$$SMC = F_1(P(\lambda_1), Q(\lambda_2), a_i) \quad (1)$$

где: $P(\lambda_1)$ -сигнал отражения почвы в видимом диапазоне; $Q(\lambda_2)$ -сигнал отражения почвы в ближнем инфракрасном диапазоне ($\lambda_2 < 1,8\text{мкм}$); a_i - постоянные, зависящие от технологии изготовления сенсора.

Далее в настоящей статье рассматривается возможность введения нового, дуального показателя водности почвы и исследуется экстремальный характер этих показателя.

Предлагаемый метод

Рассмотрим развернутый вид выражения (1)[12]:

$$SMC = a_0 + a_1 \log P(\lambda_1) + a_2 \log Q(\lambda_2) \quad (2)$$

Нами предлагаются следующие два показателя водности почвы, в виде функционала, обладающего экстремальным свойством:

Первый предлагаемый интегральный показатель имеет вид

$$\eta_1 = \int_0^{P_{max}} SMC \cdot P(\lambda_1) \cdot dP(\lambda_1) = \int_0^{P_{max}} P(\lambda_1) \cdot F_1(P(\lambda_1), Q(\lambda_2), a_i) \cdot dP(\lambda_1) \quad (3)$$

Второй предлагаемый показатель имеет вид:

$$\eta_2 = \int_0^{Q_{max}} SMC \cdot Q(\lambda_2) \cdot dQ(\lambda_2) = \int_0^{Q_{max}} Q(\lambda_2) \cdot F_2(P(\lambda_1)(Q(\lambda_2)), a_i) \cdot dQ(\lambda_2) \quad (4)$$

Далее, из-за симметричности показателей η_1 и η_2 будем исследовать экстремальное свойство только показателя η_1 . Умножим левые и правые стороны (2) на $P(\lambda_1)$ получим

$$SMC \cdot P(\lambda_1) = a_0 P(\lambda_1) + a_1 P(\lambda_1) \cdot \log P(\lambda_1) + a_2 P(\lambda_1) \cdot \log Q(\lambda_2) \quad (5)$$

С учетом фиксированности длин волн λ_1 и λ_2 далее эти длины волн не будем указывать. Проинтегрируем (5) в интервале $(0 \div P_{max})$. Имеем

$$\int_0^{P_{max}} SMC \cdot P dP = \int_0^{P_{max}} a_0 P dP + \int_0^{P_{max}} a_1 P \cdot \log P dP + \int_0^{P_{max}} a_2 P \cdot \log Q dP \quad (6)$$

Введем на рассмотрение следующую функцию связи между Q и P :

$$Q = Q(P) \quad (7)$$

В соответствии с графиками, представленными на рис. 1, функция (7) является растущей функцией.

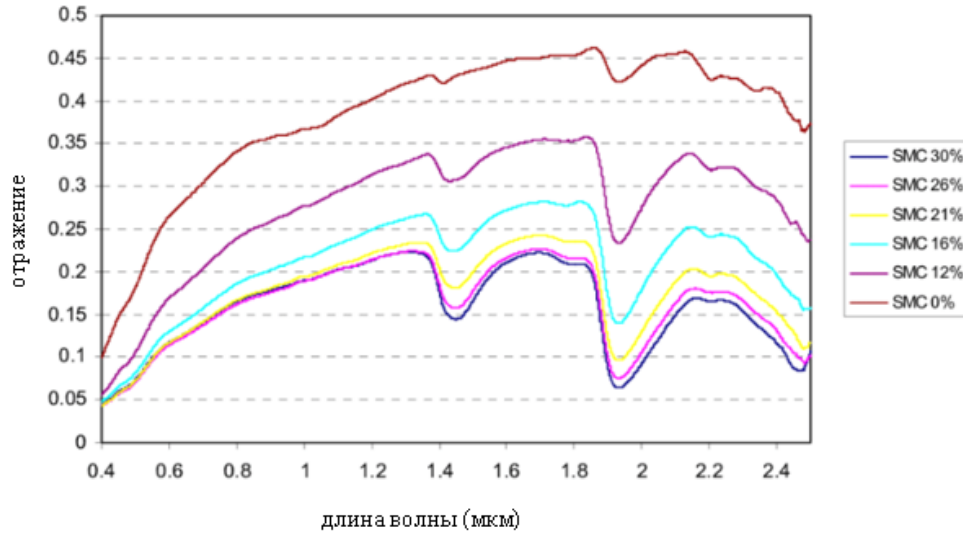


Рис. 1. Спектры отражения влажной почвы в зависимости от SMC , указанных в процентах

Составлено авторами

Примем предположение о том, что функция $Q(P)$ удовлетворяет следующему условию

$$\int_0^{P_{max}} Q(P) dP = C; \quad C = const \quad (8)$$

С учетом (6) и (8) можем составить следующую задачу вариационной оптимизации, введя дуальный целевой функционал F

$$F = \int_0^{P_{max}} SMC \cdot P dP + \gamma \left[\int_0^{P_{max}} Q(P) dP - c \right] = \int_0^{P_{max}} a_0 P dP + \int_0^{P_{max}} a_1 P \cdot \log P dP + \int_0^{P_{max}} a_2 P \log Q(P) dP + \gamma \left[\int_0^{P_{max}} Q(P) dP - C \right] \quad (9)$$

где: γ — множитель Лагранжа.

Так как левые и правые стороны (9) тождественно равны, то экстремум функционала F может быть исследован используя как первую форму записи F в виде

$$F_1 = \int_0^{P_{max}} SMC \cdot P dP + \gamma \left[\int_0^{P_{max}} Q(P) dP - C \right], \quad (10)$$

так и вторую форму записи F , в виде

$$F_2 = \int_0^{P_{max}} a_0 P dP + \int_0^{P_{max}} a_1 P \cdot \log P dP + \int_0^{P_{max}} a_2 P \log Q(P) dP + \gamma \left[\int_0^{P_{max}} Q(P) dP - C \right] \quad (11)$$

Исследуем выражение (11) на экстремум от $Q(P)$. Согласно, методу Эйлера экстремаль функционала (11) должен удовлетворять условию

$$\frac{d\{a_0P+a_1P \log P+a_2P \log Q(P)+\gamma Q(P)\}}{dQ(P)} = 0 \quad (12)$$

Из (12) получаем

$$\frac{a_2P}{Q(P) \cdot \ln 2} + \gamma = 0 \quad (13)$$

Из (13) находим

$$Q(P) = -\frac{a_2P}{\gamma \cdot \ln 2} \quad (14)$$

Из (8) и (14) получим

$$-\int_0^{P_{max}} \frac{a_2P}{\gamma \cdot \ln 2} dP = C \quad (15)$$

Из (15) находим

$$\gamma = \frac{a_2P_{max}^2}{2C \cdot \ln 2} \quad (16)$$

С учетом (14) и (16) получим

$$Q(P) = \frac{2a_2PC(\ln 2)}{(\ln 2) \cdot a_2P_{max}^2} = \frac{2PC}{P_{max}^2} \quad (17)$$

Очевидно, что при экстремали (17) функционал F в виде F_2 достигает максимума, т.к. производная (13) по $Q(P)$ оказывается отрицательной величиной. В целом, максимальную величину интегрального показателя $SMC \cdot P$. С учетом (5) и (17) представим как

$$\left[\int_0^{P_{max}} SMC \cdot P \right]_{max} = \int_0^{P_{max}} P \left[a_0 + a_1 \log P + a_2 \log \frac{2PC}{P_{max}^2} \right] dP = \int_0^{P_{max}} a_0 P dP + \int_0^{P_{max}} a_1 P \cdot \log P dP + \int_0^{P_{max}} a_2 P \log \frac{2PC}{P_{max}^2} dP = \left[\int_0^{P_{max}} P \log P dP \right] d_1 + C_1 \quad (18)$$

где:

$$C_1 = a_0P_{max} + a_1 + a_2 \log \frac{2PC}{P_{max}} \quad (19)$$

$$d_1 = a_1 + a_2 \quad (20)$$

Для доказательства свойства экстремальности вновь введенного показателя водности почвы проведем модельное исследование.

Модельное исследование

На рис. 2 представлены две кривые, которые удовлетворяют условию (8).

Вычислим подинтегральное выражение в (18) для кривой (1) в виде 4-х точечной аппроксимации. Обозначим это выражение как S . Для кривой 1 имеем:

$$S_1 = \frac{P_m}{4} \log \frac{Q_m}{6} + \frac{P_m}{2} \log \frac{Q_m}{2} + \frac{3P_m}{4} \log \frac{5Q_m}{6} + P_m \log Q_m = \frac{P_m}{4} (\log Q_m + \log \frac{1}{6}) + \frac{P_m}{2} (\log Q_m + \log \frac{1}{2}) + \frac{3P_m}{4} (\log Q_m + \log \frac{5}{6}) + P_m \log Q_m = P_m \log Q_m \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} + \frac{3}{4} + 1 \right) + P_m \left(\frac{1}{4} \log \frac{1}{6} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \log \frac{5}{6} \right) \quad (21)$$

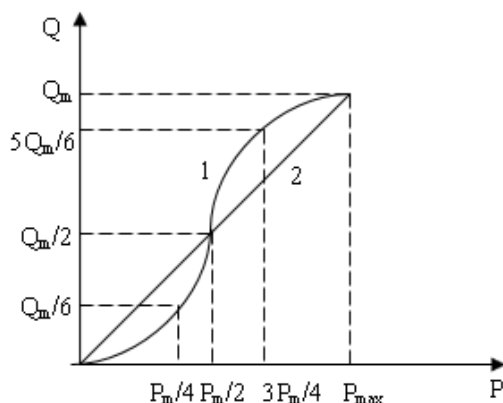


Рис. 2. Два варианта представления функции $Q = Q(P)$. Цифрами показаны: 1,2- кривые функций $Q = Q(P)$ удовлетворяющих условию (8)
Составлено авторами

Аналогично, для кривой (2) получаем:

$$S_2 = \frac{P_m}{4} \log \frac{Q_m}{4} + \frac{P_m}{2} \log \frac{Q_m}{2} + \frac{3P_m}{4} \log \frac{3Q_m}{4} + P_m \log Q_m = \frac{P_m}{4} (\log Q_m + \log \frac{1}{4}) + \frac{P_m}{2} (\log Q_m + \log \frac{1}{2}) + \frac{3P_m}{4} (\log Q_m + \log \frac{3}{4}) + P_m \log Q_m = P_m \log Q_m \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} + \frac{3}{4} + 1 \right) + P_m \left(\frac{1}{4} \log \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \log \frac{3}{4} \right) \quad (22)$$

Проведенный элементарный анализ показывает, что

$$\frac{1}{4} \log \frac{1}{6} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \log \frac{5}{6} < \frac{1}{4} \log \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \log \frac{3}{4} \quad (23)$$

Следовательно, полученный результат (23) косвенно подтверждает экстремальный характер вновь введенного показателя водности почвы.

Выводы

Предложен новый показатель водного содержания почвы. Вновь введенный показатель базируется на известном двухволновом показателе в виде скалярной свертки логарифмов коэффициентов отражения почвы в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах с постоянными коэффициентами зависящими от этих длин волн. Показан экстремальный характер предложенного показателя в виде функционала, применительно к некоторому подклассу функций зависимости сигнала отражения в ближнем инфракрасном диапазоне от сигнала отражения в видимом диапазоне. Показано, что экстремум (максимум) целевого функционала возникает при наличии линейной зависимости между указанными функциями.

Литература

1. Schanz T., Baille W., Nguyen L. Effects of temperature on measurements of soil water content with time domain reflectometry// Geotech Test J. 2011. 34(1). Pp. 1-8.

2. Dobriyal P., Qureshi A., Badola R., et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management// J. Hydrol. 2012. Pp. 110-117.
3. Kirkham MB. Principal of soil and plant relationship// British Library Cataloguing Publication Data. 2014.
4. Devaser V., Lunach A. Kr. An approach to analyse the agriculture acreage and estimate production// Indian Journal of Science and Technology (IJST). 2016. 9(28). Pp. 1-6.
5. Udagani C. Gamma ray attenuation study with varying moisture content of claybricks// Int J Eng Sci Invent. 2013. 2(7). Pp. 35-38.
6. Shukla A., Panchal H., Mishra M. Soil moisture estimation using gravimetric technique and FDR probe technique: a comparative analysis// American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences. 2014. 8(1). Pp. 89-92.
7. Bhagat VS. Space-borne microwave remote sensing of soil moisture: a review. Recent progress in space technology. 2014. 24(4). Pp. 119-150.
8. Srivastava HS., Patel P., Sharma Y., et al. Large-area soil moisture estimation using multi-incidence-angle RADARSAT-1 SAR data// Trans Geosci Remote Sens. 2009. 47(8). Pp. 2528-2535.
9. Robinson D. A., Campbell C. S., Hopmans J. W., Hornbuckle B. K., et al. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review// Vadose Zone Journal. 2008. Pp. 358-389.
10. Xiaoling Wu, Jeffrey P., Walker and Nan Ye. Inter-comparison of proximal near-surface soil moisture measurement techniques// IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2022. Pp. 2370-2378.
11. Zhe Yin, Tingwu Lei, Qinghong Yan, Zhanpeng Chen, Yuequn Dong. A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement// Computers and electronics in agriculture. 2013. Pp. 101-107.
12. Zhe Yin , Wei Qin, Changqing Zuo , Nan Yan , Bai Lil , Qiankun Guo , Zhijie Shan, Zhaoyan Wang. Reflection model for soil moisture measurement using near-infrared reflection sensor// International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM). 2015.
13. Ryoei Ito, Masaki Harada, Ayako Michida, Masaru Mizoguchi, Takashi Mishima, Takaharu Kameoka, Atsushi Hashimoto, Kenichi Nakanishi, Hiroshi Shono, Masaaki Oka, Hirokazu Taki, Fumitaka Uchio, Yasunori Saito, Hiroaki Ishizawa, Yoshitaka Motonaga, Takehiko Hoshi, Nobukazu Iguchi, Eiji Goto, Seishi Ninomiya, Masayuki Hirafuji, Tokihiro Fukatsu. Soil moisture monitoring using near-infrared sensing technique and the internet in a coffee plantation field// 2004. Afita/WCCA joint congress on it in agriculture.

G. R. G. Babaeva

***Formation of new extreme indicators of
moisture content in the soil***

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan
e-mail: asadzade@rambler.ru

Abstract. *The possibility of introducing new extreme indicators of moisture content in the soil is analyzed. A new indicator of soil moisture has been formed. The proposed indicator is based on the previously known two-wave scalar convolution of logarithms of soil reflection coefficients in the visible and near infrared ranges with weighting coefficients in the form of functions of the corresponding wavelengths. The extreme nature of the newly introduced indicator is proved, in relation to a certain subclass of functions of the dependence of the reflection signal in the near infrared range on the reflection signal in the visible range. It is shown that the maximum of the proposed indicator occurs in the presence of a linear relationship between these functions.*

Keywords: *soil, humidity, reflection spectrum, convolution, functional*

References

1. Schanz T., Baille W., Nguyen L. Effects of temperature on measurements of soil water content with time domain reflectometry// *Geotech Test J.* 2011. 34(1). Pp. 1-8. (in English)
2. Dobriyal P., Qureshi A., Badola R., et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management// *J. Hydrol.* 2012. Pp. 110-117. (in English)
3. Kirkham MB. *Principal of soil and plant relationship*// British Library Cataloguing Publication Data. 2014. (in English)
4. Devaser V., Lunach A. Kr. An approach to analyse the agriculture acreage and estimate production// *Indian Journal of Science and Technology (IJST).* 2016. 9(28). Pp. 1-6. (in English)
5. Udagani C. Gamma ray attenuation study with varying moisture content of claybricks// *Int J Eng Sci Invent.* 2013. 2(7). Pp. 35-38. (in English)
6. Shukla A., Panchal H., Mishra M. Soil moisture estimation using gravimetric technique and FDR probe technique: a comparative analysis// *American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences.* 2014. 8(1). Pp. 89-92. (in English)
7. Bhagat VS. Space-borne microwave remote sensing of soil moisture: a review. Recent progress in space technology. 2014. 24(4). Pp. 119-150. (in English)
8. Srivastava HS., Patel P., Sharma Y., et al. Large-area soil moisture estimation using multi-incidence-angle RADARSAT-1 SAR data// *Trans Geosci Remote Sens.* 2009. 47(8). Pp. 2528-2535. (in English)
9. Robinson D. A., Campbell C. S., Hopmans J. W., Hornbuckle B. K., et al. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review// *Vadose Zone Journal.* 2008. Pp. 358-389. (in English)
10. Xiaoling Wu, Jeffrey P., Walker and Nan Ye. Inter-comparison of proximal near-surface soil moisture measurement techniques// *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2022. Pp. 2370-2378. (in English)
11. Zhe Yin, Tingwu Lei, Qinghong Yan, Zhanpeng Chen, Yuequn Dong. A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement// *Computers and electronics in agriculture.* 2013. Pp. 101-107. (in English)
12. Zhe Yin , Wei Qin, Changqing Zuo , Nan Yan , Bai Lil , Qiankun Guo , Zhijie Shan, Zhaoyan Wang. Reflection model for soil moisture measurement using near-

- infrared reflection sensor// International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM). 2015. (in English)
13. Ryoei Ito, Masaki Harada, Ayako Michida, Masaru Mizoguchi, Takashi Mishima, Takaharu Kameoka, Atsushi Hashimoto, Kenichi Nakanishi, Hiroshi Shono, Masaaki Oka, Hirokazu Taki, Fumitaka Uchio, Yasunori Saito, Hiroaki Ishizawa, Yoshitaka Motonaga, Takehiko Hoshi, Nobukazu Iguchi, Eiji Goto, Seishi Ninomiya, Masayuki Hirafuji, Tokihiro Fukatsu. Soil moisture monitoring using near-infrared sensing technique and the internet in a coffee plantation field// 2004. Afita/WCCA joint congress on it in agriculture. (in English)

Поступила в редакцию 15.12.2022 г.