



ПРОБЛЕМЫ СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКОГО НАКЛОННОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЛЕСНОГО ПОКРЫТИЯ

*Ф.Агаев, д.т.н., Г. Алиева, асп. Национальное
аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджан*

При наклонном дистанционном зондировании структуры лесных массивов появляются трапециевидные искажения кадра сканирования, что снижает быстродействие спектрометрической системы. Предложено использовать жидкокристаллические спектральные фильтры с электронным управлением полосы пропускания. Теоретически обоснован оптимальный режим работы фильтра в течение кадра.

Структура лесов оказывает сильное влияние на функционирование экосистем. Например, количество, распределение и ориентация листьев в кроне деревьев влияет на способность растений принять фотосинтетически активную радиацию. Поэтому методы дистанционного зондирования (ДЗ), а в особенности наклонное зондирование [1] позволяют исследовать структуру кроны растений. Для этих целей применяют как лазерное сканирование, так и радары, установленные на летательных аппаратах. Известны работы [2, 3], в которых была использована аппаратура пассивного оптического дистанционного зондирования в одном направлении. Вместе с тем изучаемые участки земной поверхности отличаются между собой формой, то есть их трехмерная изменчивость является сильным анизотропным рефлектором [4].

Следовательно, характеристики отражения от таких растительных участков меняются при изменении угла обзора. Таким образом, бортовые спектрометрические устройства должны сканировать исследуемый лесной массив под разными углами, т.е. осуществлять многоугловое дистанционное зондирование в определенной полосе спектра.

В настоящее время единственным бортовым спектрометром, позволяющим получать многоугловые гиперспектральные данные с высоким пространственным разрешением, является спектрометр высокого разрешения CHRIS, установленный

PROBLEMS OF REMOTE OBLIQUE SPECTRORADIOMETRIC SENSING OF THE FOREST AREA STRUCTURES

*F.Agaev, Dr.Sc.(Eng.), G.Alieva, Ph.D.Stud.,
asadzade@rambler.ru
National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan*

In case of forest area structures remote oblique sensing their appear trapezoidal scan frame distortion, that decreases the spectroradiometric system operation speed. It's proposed to use liquid crystal spectral filters with electronic bandwidth control. The optimal filter mode during the frame is theoretically justified. It is common knowledge that the structure of forests has a significant impact on the functioning of ecosystems.

For instance, plants' ability to absorb photosynthetic active radiation is in many respects determined by the distribution and orientation in the crown of trees. Oblique sensing makes it possible to examine the structure of the crown from one or several directions [1]. For these purposes, both laser sensing and aircraft-mounted radars can be used. In some cases [2, 3], single-direction, passive, remote, optical sensing equipment was used for these purposes. At the same time, as it is pointed out in paper [4], many land areas are characterized by three-dimensionality and are a strong anisotropic reflector.

For this reason, reflection properties of such forest areas vary with changes of the viewing angle. That's why the on-board spectroradiometric equipment must ensure the scanning of woodland under investigation at different angles, i.e. it must ensure remote, multi-angle sensing in a particular spectral band.

It is known that the only currently-available on-board spectroradiometer that allows to obtain many-angle hyperspectral data with a spatial resolution is the CHRIS high-resolution spectrometer installed on board of the PROBA satellite [5]. At the same time, as pointed out in papers [6, 7], it is still unclear which zenith angle of the remote sensing is the optimal one for

на борту спутника PROBA [5]. При этом до сих пор остается невыясненным вопрос [6,7], какой зенитный угол дистанционных съемок является наиболее оптимальным для получения максимальной информации о структуре кроны лесных массивов.

Спектрорадиометр PROBA/CHRIS [1] – гиперспектрометр, работающий в спектральном диапазоне 411–1004 нм, число спектральных каналов – 62. При спектральном разрешении 5–12 нм этот прибор зондирует под углами 55°; 36°; 0°; –36°; –55°. Пространственное разрешение равно 34 метрам при охвате сцены 13×13 км. Согласно результатам экспериментальных исследований [1], в ходе которых были проведены спектральные измерения всего на пяти дискретных длинах волн (550; 675; 740; 805; 970 нм), многоугловое ДЗ лесного массива позволяет уменьшить погрешность определенного индекса LAI (индекс листового покрытия). Так, для буковых массивов эта погрешность уменьшилась с 32 % до 18 %, а для еловых массивов – с 58 % до 26 %. Но при планировании подобных экспериментов следует учитывать широкие возможности наклонного метода дистанционного зондирования. Они не ограничены скудным набором используемых длин волн. Такой вывод позволяет сделать полученные спектры отражения буковых и еловых лесов. Потенциальная информативность спектров отражения достаточно высока в относительно широком диапазоне длин волн.

Поэтому нам представляется, что при организации аналогичного самолетного эксперимента следует учесть некоторые обстоятельства. Если рассмотреть геометрическую схему многоугольного (наклонного) дистанционного зондирования (рис.1), то становится понятным, как появляются трапециевидные искажения прямоугольного кадра зондирования. Как видно, изменение формы исследуемой земной поверхности отражается в изменении величины углов наклона прибора к сканируемому участку. Так, при переходе от угла $\beta = 90^\circ$ к углу $\gamma \approx 45^\circ$ стороны треугольника OA_1A_2 , т.е. OA_1 и OA_2 заметно удлиняются, так как угол развертки α и высота полета $OA_0 = h$ остаются постоянными. В треугольнике OA_3A_4 удлинение сторон при $\alpha = \text{const}$ равносильно удлинению стороны от величины A_1A_2 до значения A_3A_4 .

Далее при планировании эксперимента наклонного дистанционного зондирования следует учесть, что высокая скорость сканирования гиперспектрометром ведет к снижению энергетического уровня выходного сигнала. Это ограничивает отношение сигнал/шум и приводит к снижению информативности подобных экспериментов. Выход из создавшегося положения – использование электронно-управляемых жидкокристаллических оптических

оборудование, позволяющее получать максимальное количество информации о структуре кроны лесных массивов.

As it is pointed out in paper [1], the PROBA/CHRIS spectrometer is a hyper-spectrometer operating in a spectral band of 411–1004 nm, with 62 spectral bands. With a spectral resolution of 5–12 nm, the device can perform sensing at the 55°; 36°; 0°; –36°; –55° angles. The spatial resolution is 34 meters, with area coverage of 13 km × 13 km. According to results of the experimental research presented in paper [1] (during which spectral measurements were carried out at five discrete wavelengths (550 nm; 675 nm; 740 nm; 805 nm; 970 nm)), the multi-level remote sensing of a forest area allows to reduce the index determination error LAI (foliage cover index) from 32% to 18% for beech forest areas and from 58% to 26% for spruce forest areas. However, when planning such experiments, one should take into account that potential capabilities of the remote, oblique sensing method go beyond the use of a such narrow band of wavelengths. Such conclusion can be drawn on the basis of the obtained reflection spectrums of the beech and spruce forests.

The potential information capability of the reflection spectrums is rather high in a relatively broad band of wavelengths. Further, we believe that, when organizing a similar experiment on board an airplane, the following circumstances should be taken into account:

1. When remote, oblique sensing is carried out, trapezoid distortions of the rectangular sensing area occur (See Figure 1). As may be seen in Figure 1, when angle $\beta = 90^\circ$ is changed to angle $\gamma \approx 45^\circ$, the sides of triangle OA_1A_2 , i.e. OA_1 and OA_2 , become elongated because scanning angle α and flight altitude $OA_0 = h$ remain constant. In triangle OA_3A_4 , the elongation of sides with $\alpha = \text{const}$ is equivalent to the scanning line elongation from A_1A_2 to A_3A_4 .

2. When remote, oblique sensing is planned, a low energy level of the output signal at high scanning speeds should be taken into account. While reducing the signal-to-noise ratio, it significantly reduces the information capability of such experiments. One solution to the problem is the use of liquid-crystal, optical filters whose channel bandwidth establishment time is not greater than 150 msec. It is an easy matter to calculate that, given an airplane flight speed of 500 km per hour, the potential geometrical resolution may be 20 meters at one, single wavelength. And since the transmission coefficient sufficiently high, it will

фильтров, в которых время установления канала пропускания не превышает 150 мс. Нетрудно посчитать, что при скорости полета самолета 500 км/ч, потенциальное геометрическое разрешение на одной длине волны достигнет 20 метров. При этом коэффициент пропускания имеет достаточно высокое значение, что позволяет получить высокое значение отношения сигнал/шум по сравнению с гиперспектрометрами.

Среди прочих преимуществ жидкокристаллических оптических фильтров [8] основными для использования в ДЗ являются: высокий коэффициент пропускания (до 60–80 %); высокое быстродействие регулировки длины волны пропускания (150 мс); возможность непрерывной регулировки полосы пропускания на выбранной длине волны.

Аппроксимированная амплитудно-спектральная характеристика пропускания жидкокристаллических фильтров приведена на рис.2. Как видно из графика, коэффициент пропускания в диапазоне 650–850 нм линейно возрастает, а далее в диапазоне 850–1050 нм линейно падает. Авторы работы [1] обнаружили, что высокая точность определения значения индекса LAI достижима при работе в нескольких спектральных диапазонах, но при одном постоянном значении угла наклона В то же время при использовании одного спектрального диапазона, но нескольких значений углов заметно ниже, однако такой результат не может быть признан высокопроизводительным, так как общее время сканирования ЖК-фильтром T_{Σ} через все диапазоны составит

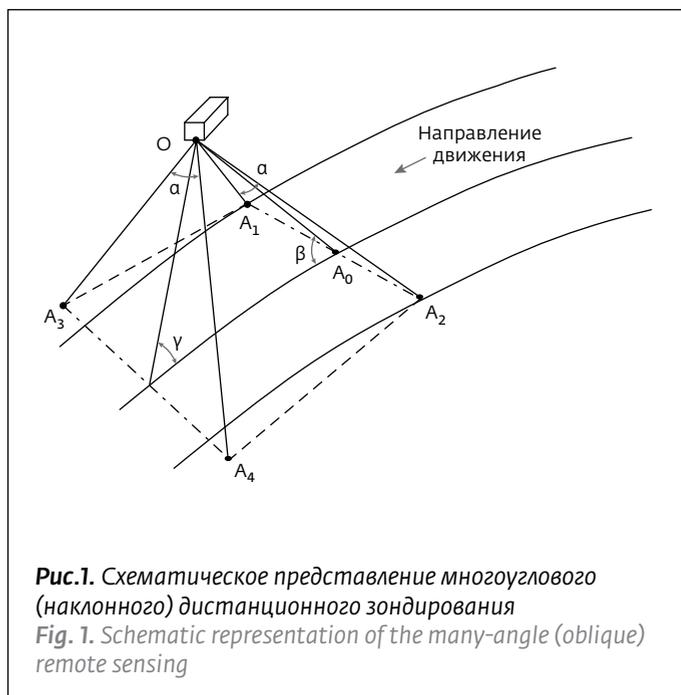
$$T_{\Sigma} = n \cdot T_0,$$

где n – количество спектральных диапазонов; T_0 – время одного переключения.

Очевидно, что чрезмерное увеличение n приводит к увеличению T_{Σ} , а это ведет к снижению быстродействия системы ДЗ. По этой причине имеет смысл несколько сузить спектральный диапазон, выбрав из него наиболее информативный участок. В таком случае задача исследования может быть сформулирована следующим образом: определить оптимальный спектральный поддиапазон из следующего множества длин волн: 650–850 нм; 850–1050 нм для получения максимальной информации.

С учетом трапециевидальной формы обзора Земли при наклонном зондировании общее количество информации по всем строкам кадра вычислим как

$$M_1 = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \log_2 \psi(\lambda) dT, \quad (1)$$



be possible to obtain a significantly high signal-to-noise ratio, compared to hyperspectrometers.

As reported in paper [8], the main advantages of the liquid crystal optical filters include the following: high transmission coefficient (up to 60%–80%); high speed of transmission wavelength adjustment (150 msec); possibility of continuous control of the bandwidth by wavelengths and other advantages.

The approximated amplitude-spectral characteristics of liquid-crystal filters are presented in Figure 2. As Figure 2 shows, the transmission coefficient demonstrates linear growth in the 650–850 nm band and linear reduction in the 850–1050 nm band.

As pointed out in paper [1], the main result of this research is that several spectral bands and one particular scanning angle give better accuracy of determination of the index LAI than one spectral band and several scanning angles. However, such result can hardly be regarded as a highly productive one because the total time of passage of the liquid crystal filter T_{Σ} through all the bands will amount to

$$T_{\Sigma} = n \cdot T_0,$$

where n is the number of spectral band and T_0 is the time of one switching.

It is obvious that that significant increase of n will result in an increase of T_{Σ} , which may cause

где T – длина строки сканирования; T_{\min} , T_{\max} – минимальные и максимальные значения T . Считаем, что структура исследуемого лесного массива гомогенна и спектральный диапазон зондирования может быть изменен непрерывно во времени. При этом вводится на рассмотрение функция $\lambda = \lambda(T)$, определяющая изменение длины волны при изменении длины строк. Следовательно, выражение (1) принимает следующий вид:

$$\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \cdot \log_2 \psi[\lambda(T)] dT. \quad (2)$$

Выражение $\psi[\lambda(T)]$ выразим как

$$\psi[\lambda(T)] = \psi_0 + \psi'_\lambda \cdot \lambda(T). \quad (3)$$

С учетом (3) выражение (2) напомним как

$$\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \log_2 [\psi_0 + \psi'_\lambda \cdot \lambda(T)] dT. \quad (4)$$

Приняв исходное предположение о линейности функции $\lambda(T)$, ограничительное условие сформулируем как

$$\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \lambda(T) dT = C. \quad (5)$$

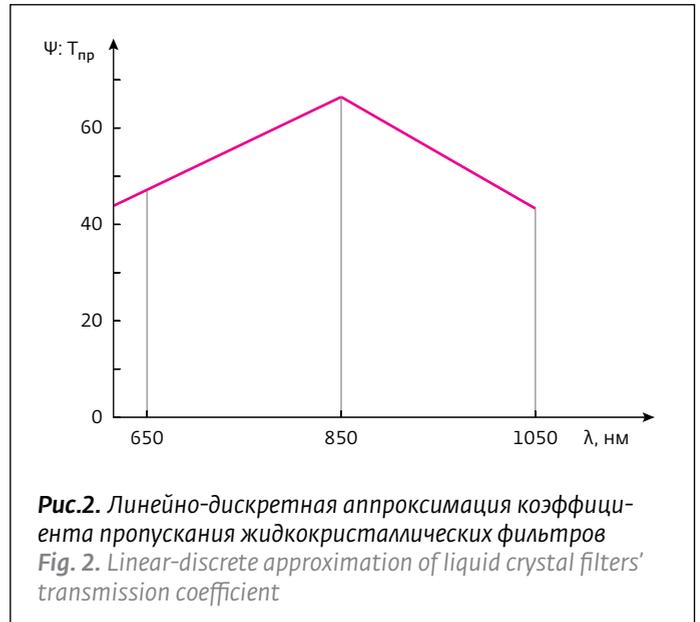


Рис.2. Линейно-дискретная аппроксимация коэффициента пропускания жидкокристаллических фильтров
Fig. 2. Linear-discrete approximation of liquid crystal filters' transmission coefficient

significant reduction of the operation speed of the remote sensing system. For this reason, it will be sensible to slightly narrow the spectral band, selecting its most informative range. In this case, the research task may be formulated as follows:

С учетом выражений (4) и (5) функционал безусловной оптимизации запишем следующим образом

$$F = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} M \cdot dT = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \log_2 [\psi_0 + \psi'_\lambda(T)] dt + \gamma \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \lambda(T) dT, \quad (6)$$

где γ – множитель Лагранжа.

Согласно правилу Эйлера, решение оптимизационной задачи должно удовлетворить условию

$$\frac{dM}{d\lambda(T)} = 0. \quad (7)$$

С учетом выражений (6) и (7) получим

$$\frac{T \cdot \psi'_\lambda}{\ln 2 [\psi_0 + \psi'_\lambda \cdot \lambda(T)]} + \gamma = 0. \quad (8)$$

Из выражения (8) имеем

$$\lambda(T) = -\frac{T}{\gamma \cdot \ln 2} - \frac{\psi_0}{\psi'_\lambda}. \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в условие (5), получим

$$-\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \left[\frac{T}{\gamma \ln 2} + \frac{\psi_0}{\psi'_\lambda} \right] dT = C. \quad (10)$$

Из выражения (10) окончательно находим:

$$\gamma = -\frac{(T_{\max}^2 - T_{\min}^2)}{2 \ln 2 \left[C + \frac{\psi_0 (T_{\max} - T_{\min})}{\psi'_\lambda} \right]}. \quad (11)$$

Таким образом, как видно из полученного решения (9, 11), при положительном значении величины ψ'_λ искомая функция $\lambda(T)$ является линейно растущей функцией T . При отрицательной величине ψ'_λ , $\lambda(T)$ превращается в линейно спадающую функцию T .

Следовательно, если в качестве рабочего поддиапазона выбрать интервал 650–850 нм, где ψ'_λ имеет положительное значение, система будет работать в оптимальном режиме при условии линейного увеличения длины волны зондирования λ во времени T . Такой режим зондирования обеспечивает исследование различных гомогенных участков лесного массива на разных длинах волн. В отличие от метода, используемого в работе [1], новый режим позволяет извлечь максимальное количество информации для вычисления вегетационных индексов лесного участка, используя непрерывные спектральные данные отражения.

Сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования. Во-первых, при использовании наклонного дистанционного зондирования структуры лесных массивов возможно появление трапециевидных искажений кадра сканирования. С учетом проведения гиперспектральных измерений

Determination of the optimal spectral sub-range from the set {650-850 nm; 850-1050 nm} which will be the best one from the viewpoint of obtaining the maximum amount of information.

With due account taken of the trapezoidal earth surveillance form in case of oblique sensing, the total amount of information in all the lines will be calculated as follows:

$$M_1 = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \log_2 \psi(\lambda) dT, \quad (1)$$

where T is the length of the scanning line and T_{\min}, T_{\max} are the minimum and maximum values of T . We assume that the structure of the forest area under investigation is homogenous and the sensing spectral range may be changed continuously in time. In addition, the function $\lambda = \lambda(T)$, which determines the wavelength change with the change of the line length, is introduced. Consequently, the expression (1) assumes the following form:

$$\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \cdot \log_2 \psi[\lambda(T)] dT, \quad (2)$$

The expression $\psi[\lambda(T)]$ will be expressible as

$$\psi[\lambda(T)] = \psi_0 + \psi'_\lambda \cdot \lambda(T). \quad (3)$$

Taking due account of (3), the expression (2) will be written as follows:

$$\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \log_2 [\psi_0 + \psi'_\lambda \cdot \lambda(T)] dT. \quad (4)$$

Having accepted the assumption that function $\lambda(T)$ is linear, restrictive condition can be formulated in the following way:

$$\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \lambda(T) dT = C. \quad (5)$$

With account taken of the expressions (4) and (5), the unconditional optimization functional can be written as

$$F = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} M \cdot dT = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \log_2 [\psi_0 + \psi'_\lambda(T)] dt + \gamma \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \lambda(T) dT, \quad (6)$$

where γ is the Lagrange multiplier.

According to the Euler rule, resolution of the optimization task must satisfy the condition:

$$\frac{dM}{d\lambda(T)} = 0. \quad (7)$$

Taking into account expressions (6) and (7), we arrive at



искажения такого рода могут привести к снижению быстродействия работы системы. Во-вторых, в системах наклонного зондирования структуры лесного покрытия целесообразно использовать жидкокристаллические спектральные фильтры с электронным управлением полосой пропускания. Такие ЖК-фильтры придают измерительной системе больший коэффициент пропускания. В-третьих, для достижения максимальной информативности разработан метод организации режима непрерывного временного изменения полосы пропускания ЖК-фильтра в течение одного кадра. Съемка на возрастающем участке амплитудно-спектральной характеристики пропускания ЖК-фильтра дает возможность оптимизировать работу системы наклонного зондирования структуры лесного покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schlerf M., Atzberger C. Vegetation structure retrieval in beech and spruce forests using spectrodirectional satellite data. – IEEE Journal of selected topics applied observations and remote sensing, 2012, v. 5, № 1, p.8-17.
2. Kalacska M., Sanchez-Azofeifa G.A., Rivard B., Caelli T., White H.P., Calvo-Alvarado J.C. Ecological fingerprinting of ecosystem succession: Estimating secondary tropical dry forest structure and diversity using imaging spectroscopy. – Remote sensing environment, 2007, v. 108, p. 82-96.
3. Lu D.S., Batistella M., Moran E. Satellite estimation of above-ground biomass and impacts of forests stand structure. – Photogram Eng. Remote sensing, 2005, v. 71, № 8, p. 967-974.
4. Liang S., Strahler A., Bernsley M., Borel C., Gerstl S., Plata F., et.al. Multirange remote sensing: Past and future. – Remote sensing Review, 2000, v. 18, p. 83-102.
5. Barnsley M.J., Settle J.J., Cutter M.A., Lobb D.R., Teston F. The PROBA/CHRIS mission: A low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere. – IEEE Trans. Geosci. Remote sensing, 2004, v. 42, № 7, p. 1512-1520.
6. Qin W., Liang S. Plane-parallel canopy radiation transfer modeling: Recent advances and future directions. – Remote sensing Review, 2000, v. 18, p. 281-306.
7. Kimes D.S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Abuelgasim A.A., Gao F. Inversion methods for physically-based model. – Remote sensing Review, 2000, v. 18, p. 381-499.
8. Liquid Crystal Tunable Filters. – www.perkinelmer.com/VariSpec.

$$\frac{T \cdot \Psi'_\lambda}{\ln 2 [\Psi_0 + \Psi'_\lambda \cdot \lambda(T)]} + \gamma = 0. \quad (8)$$

From the expression (8), we have

$$\lambda(T) = -\frac{T}{\gamma \cdot \ln 2} - \frac{\Psi_0}{\Psi'_\lambda}. \quad (9)$$

Having substituted the expression (9) into the condition (5), we obtain

$$-\int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \left[\frac{T}{\gamma \ln 2} + \frac{\Psi_0}{\Psi'_\lambda} \right] dT = C. \quad (10)$$

Taking the expression (10), we finally arrive at:

$$\gamma = -\frac{(T_{\max}^2 - T_{\min}^2)}{2 \ln 2 \left[C + \frac{\Psi_0 (T_{\max} - T_{\min})}{\Psi'_\lambda} \right]}. \quad (11)$$

Thus, as seen from the obtained solution (9, 11), when Ψ'_λ is positive, the desired function $\lambda(T)$ is linearly growing function T . When the value Ψ'_λ is negative, $\lambda(T)$ becomes a linearly decreasing function T .

Consequently, if the 650-850 nm sub-range is selected as the operating sub-range (where Ψ'_λ is positive), the system will operate in the optimal mode, provided that linear growth of the wavelength λ in time is ensured. Such sensing mode ensures exploration of various homogenous forest areas at different wavelengths. Unlike the mode described in paper [1], this mode makes it possible to obtain the maximum amount of information for further calculation of forest areas' vegetation indices, using continuous spectral reflection data.

In closing, we can state the following main conclusions and principles of the research carried out. At first, it was observed, that, in the course of the oblique remote sensing of the forest area structure, the trapezoidal distortion of the scanning raster may occur. In view of the need to carry out hyper-spectral measurements, this may cause reduction of the system operation. Second, it was also noted, that, in the systems of oblique sensing of forest area crown structure, it would be practical to use electronically-controlled-transmission-range liquid crystal filters with a high transmission index. And it was shown, that it is possible to optimize operation of the system of oblique remote sensing of forest area crowns in order to obtain the maximum amount of information using the raising section of the amplitude-spectral characteristic of liquid crystal filters in the mode of continuous change of the filter transmission band within one particular frame.