

Ю.А. АБРАМЯН, Р.М. МАРТИРОСЯН, С.Г. МАРТИРОСЯН,
С.С. ГЁЗАЛЯН

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИК-РАДИОМЕТР

Приводится схема универсального ИК-радиометра, позволяющего проводить измерения слабых фотоэлектрических сигналов на уровне значительно ниже собственных шумов фотоприемных устройств в диапазоне длин волн 0,4...20 мкм. В радиометре применена одновременно механическая и электрическая модуляция. Предложен специфический подход при разработке отдельных блоков. Малогабаритный механический модулятор помещен на оси оптической системы и позволяет легко нацеливаться на объект. Радиометр имеет широкий динамический диапазон измеряемой мощности оптического излучения.

Ключевые слова: радиометр, модулятор, сигнал, шум.

1. **Введение.** Современные достижения техники дистанционного зондирования оказались возможными благодаря построению радиометрических систем измерения слабых сигналов на фоне шумов. Радиометрия или пассивная радиолокация лежит в основе сверхточных измерений мощности собственного излучения окружающих тел. Наряду с измерениями в видимой области спектра, ИК- радиометрия используется для получения тепловых карт поверхности Земли, с целью получения информации о возможных полезных ископаемых и грунтовых водах, для решения задач метрологии, геофизики и сельского хозяйства, в тепловидении, медицине и системах обнаружения целей военной техники [1-4].

Прогресс в использовании ИК радиометрических систем в основном наблюдается с 70-х годов в связи с появлением высокочувствительных фотоприемников на основе полупроводников (в частности, $Pb_{1-x}Sn_xTe$ и $Cd_{1-x}Hg_xTe$) с максимумом фотопроводимости в окнах прозрачности атмосферы $\lambda = 3...4 мкм$, $\lambda = 4,5...5,5 мкм$, $\lambda = 8...14 мкм$, что соответствует излучению окружающих тел, имеющих температуру $T \geq 300K$.

Качество ИК радиометрических систем, в плане обнаружения слабых фотоэлектрических сигналов на фоне шумов, определяется в основном характеристиками используемых приемников ИК излучения. Как известно, к таким характеристикам относятся эквивалентная мощность шумов (NEP) и обнаружительная способность D^* , определяемые следующим образом [1-4]:

$$NEP = \frac{U_N}{U_S} \frac{P}{\sqrt{\Delta f}}, \quad D^* = \frac{U_S}{U_N} \frac{\sqrt{A \Delta f}}{P},$$

где P - падающая на фотоприемник мощность излучения; A - активная площадь фотоприемника; Δf - полоса пропускания измерительного устройства; U_S и U_N - напряжение полезного сигнала и шума, соответственно.

Пороговые характеристики фотоприемников определяются при условии $U_S/U_N = 1$.

Анализ характеристик фотоприемных структур показывает, что для реализации реальных параметров конкретного фотоприемного устройства (чувствительности, быстродействия, области полосы частот) необходим определенный подход при разработке того или иного блока измерительного устройства (выбор режима работы, степень согласования с измерительным трактом и т. п.) [4-6].

Соответствующий выбор времени интегрирования сигнала позволяет с помощью радиометра обнаружить сигналы на несколько порядков слабее его собственных шумов. Применение традиционного механического модулятора в радиометрических системах имеет определенные недостатки. Во-первых, трудно избавиться от электрических наводок и помех, создаваемых вращающимся двигателем и электрической схемой его запуска. Во-вторых, механический переключатель ограничивает выбор частоты модуляции. И, наконец, в радиометрических системах с механическим модулятором основной вклад в общие шумы системы вносят фоновые шумы окружающих тел. Эти обстоятельства являются причиной для перехода к ИК-системам, в которых отсутствует механический модулятор [7-9]. Это дает возможность реализовать электрическую схему радиометра в виде единой интегральной микросхемы.

2. Описание принципа работы универсального ИК-радиометра. В настоящей работе приведены результаты нашей многолетней работы по созданию универсального ИК-радиометра, в котором совмещаются оба принципа радиометрической обработки слабых сигналов. Структурная схема предложенного радиометра приведена на рис. 1.

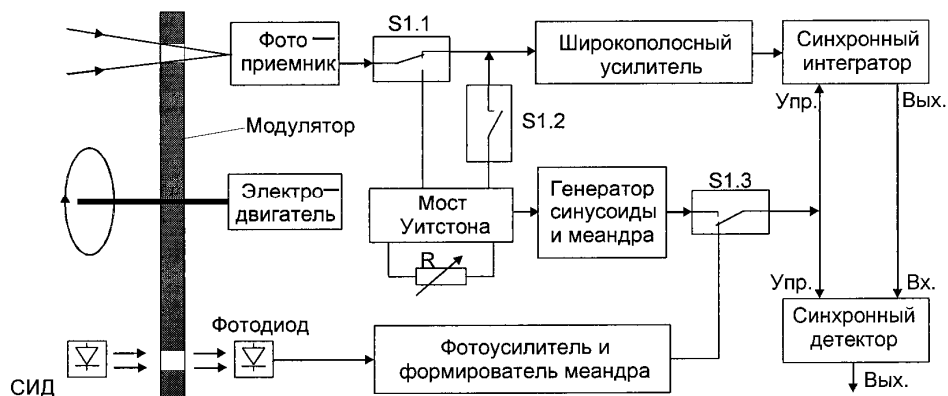


Рис.1. Структурная схема универсального ИК-радиометра

Во время работы в режиме внешней механической модуляции фотоприемник с помощью переключателя S1.1 подключается ко входу широкополосного усилителя. Причем контакты переключателя S1.1-S1.3 срабатывают одновременно. При этом синхронизирующие импульсы формируются с помощью пары светодиод – фотодиод (СИД, ФД) и через контакты S1.3 подаются на синхронный интегратор и детектор. Контакты S1.2 в этом режиме разомкнуты. В режиме внутренней электрической модуляции двигатель обесточивается, фотоприемное отверстие устанавливается в открытое состояние, фотоприемник с помощью переключателя S1.1 подключается к электрическому мосту Уитстона, выход которого с помощью переключателя S1.2 подключается ко входу широкополосного усилителя.

Мост питается от генератора синусоидального напряжения. Генератор выдает также прямоугольные импульсы (меандр), синхронные с синусоидальным напряжением, которые с помощью переключателя S1.3 подаются на синхронный фильтр и детектор. Универсальный ИК-радиометр позволяет работать в обоих режимах и сравнивать между собой результаты измерений.

Для обеспечения большого динамического диапазона системы при отсутствии сигнала фоновые шумы предварительно балансируются с помощью переменного резистора R. При появлении ИК излучения, из-за разбаланса плеч моста, на его выходе появляется электрический сигнал, пропорциональный мощности падающего излучения. Дальнейшая обработка сигнала производится аналогично классической системе, при этом существенно улучшаются как шумовые характеристики, так и стабильность работы всей системы. При питании электрического моста Уитстона меандром [7-9] из-за наличия емкостных составляющих в плечах моста, даже при полной балансировке сопротивлений, возникают импульсы длительностью 1...10 мкс и с амплитудой несколько десятков милливольт. Они перегружают предусилитель с большим коэффициентом усиления, что ухудшает стабильность работы системы и точность измерений. По этой причине в нашей схеме питание моста осуществляется синусоидальным напряжением.

3. Конструкция универсального ИК-радиометра. Общая конструкция универсального ИК-радиометра приведена на рис. 2.

Разработанный радиометр построен по осесимметричной схеме. В качестве опорного излучателя используется диск модулятора, температура которого стабилизируется. При таком построении изображение объекта на матовой поверхности модулятора можно наблюдать через окуляр, установленный в отверстии зеркала. Это позволяет хорошо нацеливаться на объект или его определенный участок. В отличие от [10], модулятор сконструирован в латунном кубике со стороной 25 мм и помещен в фокусе длиннофокусного отражающего вогнутого зеркала.

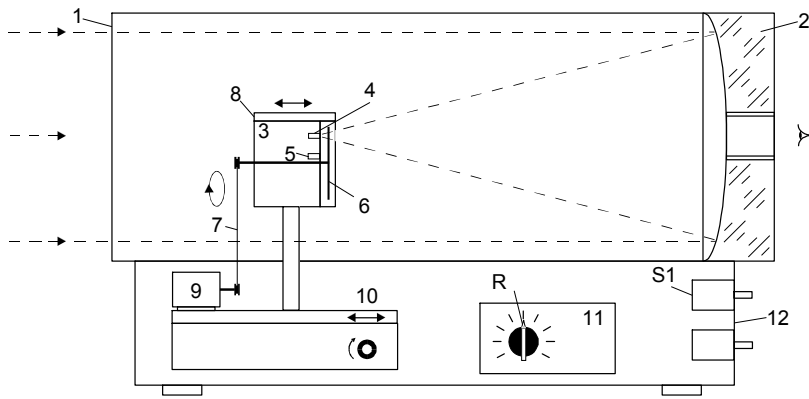


Рис.2. Схематическое изображение конструкции ИК-радиометра:

1-кожух радиометра; $d=130$ мм, $l=400$ мм; 2 - вогнутое отражающее зеркало с окуляром; 3 - корпус механического модулятора; 4 - измерительный фотоприемник; 5 - синхронизирующая пара светодиод – фотодиод; 6 - секторный модулятор; 7 – ро-лик и резиновый пассик передачи вращения; 8 – термостат; 9 – электродвигатель; 10 - узел перемещения модулятора; 11 - блок электроники; 12 - панель управления

Изображения модулятора со стороны зеркала и сбоку приведены на рис.3а и б.

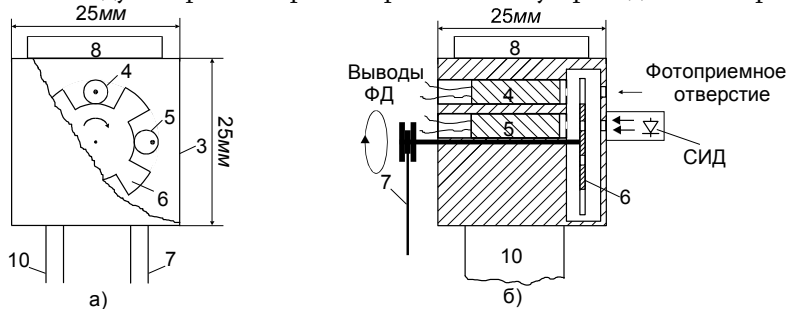


Рис.3. Конструкция модулятора

Центр диафрагмы (диаметром 0,3мм) измерительного фотоприемника находится на оптической оси зеркала. Синхронизирующий фотодиод смещен по направлению вращения секторного модулятора на целое количество отверстий (90° по углу). Диафрагма этого фотодиода смещена на 1мм относительно своего центра вращения. Поворотом диафрагмы фотодиода синхронизации 5 в корпусе модулятора 3 обеспечивается фазовый сдвиг на $\pm 15^\circ$ между импульсами синхронизации и импульсами измерительного канала. Температурная стабилизация модулятора (секторного модулятора 6, фотоприемника 4, синхронизирующей пары светодиод-фотодиод 5) обеспечивается термостатом 8.

4. **Электрическая схема.** Ниже приводится описание электрических схем узлов радиометра, представляющих определенный интерес. На рис. 4 приведена схема

широкополосного усилителя, выполненная на малошумящих операционных усилителях DA1- DA3.

При работе с внешней модуляцией операционный усилитель DA1 включается по схеме преобразователя ток – напряжение. Такая схема обеспечивает для фотоприемника режим короткого замыкания, благодаря чему резко уменьшаются наводки на входную цепь подключения [11].

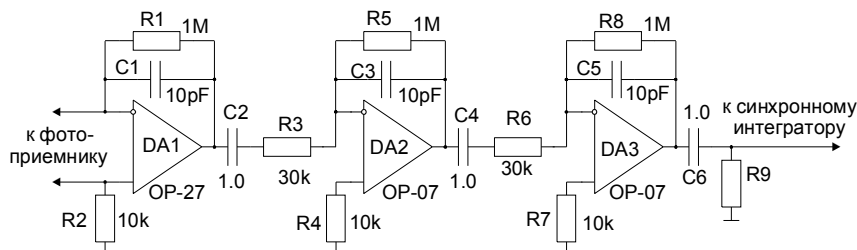


Рис.4. Схема широкополосного усилителя

Коэффициент преобразования регулируется с помощью переменного резистора R1 в пределах $10\text{кОм} \dots 5,1\text{МОм}$. Во время работы радиометра с внутренней модуляцией микросхема DA1 работает в режиме дифференциального усилителя с регулируемым коэффициентом усиления $K = 10 \dots 100$. Применение дифференциального усилителя на одном операционном усилителе позволяет в $\sqrt{2}$ раза уменьшить уровень шумов по сравнению с измерительным усилителем на трех операционных усилителях [11]. Коэффициент усиления последующих двух каскадов составляет $K = 1000$. Полоса пропускания предусилителя ограничена снизу емкостями C2, C4, C5 на уровне $\approx 60\text{Гц}$, а сверху - емкостями C1, C3, C5 на уровне $\approx 10\text{кГц}$.

На рис.5 приведены электрические схемы синхронного интегратора и детектора. Микросхема DA1 служит для компенсации потерь в самом синхронном интеграторе, выполненном на DD1, R5, C3, C4. Конденсатор C2 и резистор R6 служат для точной регулировки остаточного сигнала разбаланса при отсутствии полезного сигнала. DA2 является согласующим повторителем, имеющим почти нулевое выходное сопротивление, необходимое для точной работы синхронного детектора на DA3 и DD1. Синхронный детектор представляет собой прецизионный фазовый детектор с переключением знака усиления с последующим интегрированием полезного сигнала на R15, C5 [12]. Неинвертирующий усилитель ($K = 2$), необходимый для согласования выходного сопротивления интегратора с нагрузкой (входное сопротивление регистрирующего устройства), а также для установки нулевого уровня на выходе радиометра при отсутствии полезного сигнала, выполнен на DA4.

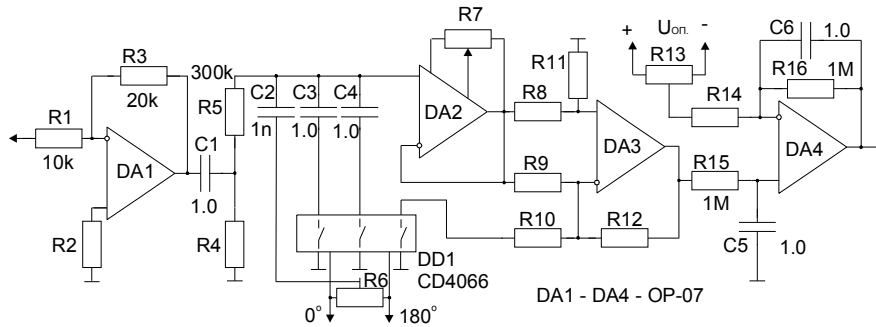


Рис.5. Схема синхронного интегратора и детектора

По существу, синхронный интегратор является гребенчатым фильтром, частота настройки которого определяется частотой опорного сигнала, а ширина полос, составляющих «гребенки», интегрирующими цепочками R5, C3 и R5, C4. В этой полосе содержится полезный сигнал. Для двухзвенного интегратора:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6}} \approx 0,5 \text{ Гц}.$$

Полоса пропускания выходного интегрирующего звена R15, C5 равняется

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,0 \cdot 10^6 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6}} \approx 0,16 \text{ Гц}.$$

Выигрыш в отношении сигнал/шум в синхронном интеграторе и детекторе определяется тем, что при постоянной времени $\tau = RC \gg T_0$ (где T_0 - период входного сигнала) импульсы детерминированного сигнала суммируются в $n = RC/T_0$ раз, а его энергия в n^2 раз, где n - число импульсов, просуммированных за время 3τ . Флуктуационные помехи складываются по мощности, поэтому отношение сигнал/шум возрастает в n раз:

$$\frac{S}{N} = \frac{3RC}{T_0} = 3RC \cdot f_0 = 3 \cdot 0,3 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6} \cdot 400 = 360$$

для выбранной частоты модуляции $f_0 = 400 \text{ Гц}$.

Как известно, радиометрическим выигрышем называется отношение

$$B = \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta F}}, \text{ где } B \approx \frac{U_{\text{шум.ВХ.}}}{U_{\text{шум.ВЫХ.}}},$$

Δf - полоса приема на входе радиометра; ΔF - полоса пропускания выходного устройства радиометра (интегратора), которое показывает, во сколько раз максимальный сигнал, обнаруживаемый радиометром, меньше его собственных шумов. В нашем случае, $\Delta f = 10 \text{ кГц}$, $\Delta F = 0,16 \text{ Гц}$ $B = \sqrt{10^4/0,16} = 250$.

Многолетний опыт разработки ИК-радиометров показывает, что реальный выигрыш меньше теоретического в 2...3 раза. Дело в том, что управляющие импульсы аналоговых ключей на микросхеме DD1, действующие на затворе,

проходят на выход интегратора через дифференцирующие внутренние межэлектродные емкости $C_{Зат.Ист}$, или $C_{Зат.Ст}$, ($10...15\pi\Phi$). Они интегрируются на цепочке R5, C3 или R5, C4 большим постоянным временем и выступают в качестве прямоугольного остаточного напряжения разбаланса (помехи), уровень которого составляет порядка $0,3...1\text{мВ}$. Во время коммутации эффективная емкость увеличивается в $5...10$ раз, что наряду с температурной зависимостью межэлектродных емкостей приводит к нестабильности этого напряжения не только по амплитуде, но и по фазе. В итоге амплитуда шумового сигнала на выходе интегратора, обусловленная только интегратором, составляет порядка $3...5\text{мВ}$.

Динамический диапазон по амплитуде на выходе интегратора составляет

$$D = \frac{U_{ОУ}}{U_{ШУМ}} = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ мВ}}{10 \text{ мВ}} = 10^3,$$

где $U_{ОУ}$ - максимальная амплитуда сигнала на выходе ОУ, $U_{ОУ} = 10\text{В}$ при напряжении питания ОУ $\pm 12\text{В}$, $U_{ШУМ} = 10\text{мВ}$.

Для рассматриваемого класса измерений $D \geq 10^2$ уже является достаточной величиной. Поэтому коэффициент усиления после синхронного интегратора должен быть минимальным (в данном случае $K = 2$).

Максимальная величина коэффициента усиления ограничивается напряжением насыщения ОУ на выходе широкополосного усилителя. Например, если ожидается уровень выигрыша, равный 100, то из соотношения

$$B = \frac{U_{Ш}}{U_{СИГН}} = \frac{U_{Ш.УСИЛ.}}{U_{Ш.СИНХР.ИНТ}},$$

следует

$$U_{Ш.УСИЛ.} = B \cdot U_{Ш.СИНХР.ИНТ} = 100 \cdot 10 \text{ мВ} = 1000 \text{ мВ},$$

то есть, динамический диапазон радиометра ограничивается только динамическим диапазоном широкополосного усилителя.

Из вышесказанного следует:

а) для получения максимальной чувствительности радиометра основное усиление необходимо обеспечить в предварительных каскадах широкополосного усиления (до интегратора);

б) для увеличения динамического диапазона радиометра в выходном каскаде широкополосного усилителя необходимо использовать ОУ с высоковольтным питанием (например, $\pm 27\text{В}$, $\pm 40\text{В}$);

в) для повышения точности измерений необходимо стабилизировать температуру электронных коммутаторов.

Измерение чувствительности радиометра проводилось посредством излучающих диодов ЗЛ107Б, имеющих длину волны излучения от $0,9$ до $1,2\text{мкм}$, с применением ряда ослабителей потока инфракрасного излучения. Калибровка диодов и ослабителей проводилась прибором ИМО-2. Для проверки работоспособности радиометра в качестве фотоприемника использовался промышленный фотодиод ФД-256. Для данного фотоприемника получено

$$D^* = (3...6) \cdot 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

5. Технические данные радиометра: диаметр оптической системы - 125мм; длина оптической системы - 400мм; регулировка фокусного расстояния - 1,5м...∞; угол поля зрения - 4угл.мин; диаметр диафрагмы фотоприемника - 0,3мм; размеры блока электронной обработки - 60·80·400мм; обнаружительная способность для ФД-256 ($\lambda = 1\text{мм}$) - $3...6 \cdot 10^{13} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$; потребляемая мощность (без термостата) - 10Вт.

6. Выводы

1. Предложен специфический подход при разработке отдельных блоков радиометра.
2. Разработанный радиометр работает в широком оптическом диапазоне 0,4...20мм.
3. Радиометр работает с любым фотоприемником с применением механической модуляции оптического излучения, а также внутренней электрической синусоидальной модуляции фотоэлектрического сигнала.
4. В радиометре использована простая оптическая система с возможностью нацеливания на объект.
5. Разработанный малогабаритный механический модулятор, слабо перекрывающий принимаемое излучение, находится на оси оптической системы.
6. Применен простой способ регулировки фазы синхронизирующих импульсов.
7. Радиометр имеет широкий динамический диапазон измеряемой мощности оптического излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хадсон Р. Д. Инфракрасные системы. - М.: Мир, 1972.-534с.
2. Kingston R. H. Detection of Optical and Infrared Radiation. Springer-Verlag, New York, 1978.-264p.
3. Абрамян Ю. А., Гаспарян Ф. В., Мартиросян Р. М. Пороговые характеристики фотодетекторов. ИК-радиометры и основные материалы современной фотоэлектроники. - Ереван: ЕГУ, 2000.-153с.
4. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. - М.: Радио и связь, 1992.-400с.
5. Якушенков Ю. Г., Луканцев В. Н., Колосов М. П. Методы борьбы с помехами в оптикоэлектронных приборах. - М.: Радио и связь, 1981.-180с.
6. Перволюсов Ю. Б., Солдатов В. П., Якушенков Ю. Г. Проектирование оптико-электронных приборов. - М.: Машиностроение, 1990.-432с.
7. Abrahamian Yu. A., Martirosian S. G., Adamian Z. N., Arutiounian V. M., Gasparian F. V. International Journal of Infrared and Millimeter Waves. -1998.-19.- P.827-833.

8. **Абрамян Ю. А., Кочарян К. Н., Мартиросян С. Г., Адамян З. Н., Арутюнян В. М., Гаспарян Ф. В.** Малошумящий высокочувствительный ИК-радиометр // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2001. – Т.54, №1.- С.141-147.
9. **Abrahamian Yu. A., Karamian G. G., Martirosian S. G., Stafeev V. I., Gasparian F. V., Vagarshakian V. M.** International Journal of Infrared and Millimeter Waves.-2002.-23.- P.1753-1764.
10. **Буданов А. В.** Оптический журнал.-2001. –Т. 68, №12.- С.64.
11. **Нетцер И.** ТИИЭР.-1981.-Т.69, №6.- С.58.
12. **Гвалтиери Д. М.** Приборы для научных исследований.-1986.-№2.-С.136.

Институт радиофизики и электроники НАН РА. Материал поступил в редакцию 17.11.2004.

**Յու.Ա. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ, Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ս.Գ.ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ,
Ս.Ս. ԳՅՈԶԱԼՅԱՆ**

ՀԱՄԱՊԻՏԱՆԻ ԻԿ ՌԱԴԻՈՄԵՏՐ

Բերված է համապիտանի ԻԿ-ռադիոմետրի սխեմա, որը թույլ է տալիս կատարել թույլ ֆոտոէլեկտրական ազդանշանների չափումներ ֆոտոդետեկտորի սարքերի սեփական աղմուկներից զգալիորեն ցածր մակարդակի վրա, 0,4-20 մկմ ալիքային տիրույթում: Ռադիոմետրում օգտագործված է միաժամանակ և՛ մեխանիկական, և՛ ներքին էլեկտրական մոդուլյացիա: Առանձին բլոկների մշակման համար առաջարկված է յուրահատուկ մոտեցում: Փոքրածավալ մեխանիկական մոդուլյատորը տեղադրված է համակարգի օպտիկական առանցքի վրա և թույլ է տալիս հեշտությամբ ուղղորդվել դեպի օբյեկտը: Ռադիոմետրն ունի օպտիկական ճառագայթման չափվող հզորության լայն դինամիկ տիրույթ:

**Yu.A. ABRAHAMIAN, R.M. MARTIROSIAN, S.G. MARTIROSIAN,
S.S. GYOZALYAN**

UNIVERSAL IR-RADIOMETER

A structure of an all-purpose IR-radiometer in the wavelength range 0.4 to 20 μm which allows us to measure weak photoelectric signals, at the levels considerably lower than the internal noise level of photo-detectors is described. Both the mechanical and electrical modulations of radiation are used in the radiometer. A specific approach to design some units is suggested. The small chopper is placed on the optical axis of the device allowing to target the object easily. The radiometer has a broad dynamic range of the measured optical radiation power.