

Ю.А. АБРАМЯН, К.Н. КОЧАРЯН, С.Г. МАРТИРОСЯН,
З.Н. АДАМЯН, В.М. АРУТЮНЯН, Ф.В. ГАСПАРЯН

МАЛОШУМЯЩИЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ИК-РАДИОМЕТР

Приводится схема ИК-радиометра, позволяющая проводить измерения слабых фотоэлектрических сигналов на уровне значительно ниже собственных шумов фотоприемных устройств в окнах прозрачности атмосферы $\lambda = 4,5...5; 8...13$ мкм. В отличие от аналогичных разработок, в предлагаемой схеме применены дополнительные решения по уменьшению шумов предусилителя, стабилизации амплитуды импульсов питания фоточувствительного моста, коррекции фаз опорного и полезного сигналов, а также по улучшению характеристик синхронного детектора.

Ключевые слова: радиометр, чувствительность, излучение, фотоприемник, шум.

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 энергии и мощности излучения окружающих тел по их собственному излучению.

ИК-радиометрия сегодня используется для получения тепловых карт поверхности Земли с целью получения информации о возможных полезных ископаемых и грунтовых вод, для решения задач метрологии, геофизики и сельского хозяйства, в тепловидении, медицине, в системах обнаружения целей военной техники [1-7]. Прогресс в использовании ИК-радиометрических систем в основном наблюдается с 70-ых 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 ($\lambda = 4,5...5; 8...13$ мкм) [1,5], что соответствует излучению окружающих тел, имеющих температуру $T \geq 300$ К.

Качество ИК-радиометрических систем, в смысле 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 [1-3,5]:

$$NEP = \frac{U_N}{U_S} \frac{P_\lambda}{\sqrt{\Delta f}}, \quad D^* \equiv \frac{U_S}{U_N} \frac{\sqrt{A \Delta f}}{P_\lambda}, \quad (1)$$

где P_λ - падающая на приемник мощность излучения; A - активная площадь фотоприемника; Δf - полоса пропускания измерительного устройства; U_S и U_N - напряжения полезного сигнала и шума соответственно.

Пороговые характеристики фотоприемников определяются при условии

$$U_S/U_N = 1.$$

Отношение сигнал/шум (U_S/U_N или I_S/I_N), выраженное через отношение мощностей для любого фотоприемного устройства с учетом тепловых и генерационно-рекомбинационных шумов, можно представить в виде [5,9,10]

$$\frac{S}{N} = \frac{I_s^2}{I_N^2} = \frac{I_s^2}{I_{N,G-R}^2 + 4kT\Delta f / R}, \quad (2)$$

где первый член в знаменателе правой части представляет среднеквадратичное значение генерационно-рекомбинационного шума сигнала, фона и темнового тока, а второй – тепловой шум сопротивления фотоприемника.

Низкочастотный шум типа $1/f$ в (2) не учитывается ввиду того, что подбором частоты модуляции его можно всегда уменьшить до пренебрежимо малых значений.

В общем случае, генерационно-рекомбинационный шум можно представить в виде

$$\overline{I_{N,G-R}} = \sqrt{2eI\Delta f}, \quad (3)$$

где $I = I_T + I_P + I_S$ – полный ток фотоприемника, состоящий из темнового тока I_T , фототока, созданного излучением фона $I_P = eP_P\eta/h\nu$, и сигнального фототока $I_S = eP_S\eta/h\nu$.

Тогда (2) можно записать в виде

$$\frac{S}{N} = \frac{\left(\frac{eP_S\eta}{h\nu}\right)^2}{2e\left\{\left[\frac{e(P_S + P_P)\eta}{h\nu} + I_T\right]\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R}\right\}}, \quad (4)$$

где P_S и P_P - мощности сигнала и фона соответственно; η - квантовый выход; $h\nu$ - энергия фотона.

Уравнение (4) позволяет проанализировать все возможные случаи, ограничивающие прием слабых сигналов на фоне шумов. Так, для идеального фотоприемника, когда основным источником шумов является падающий на фотоприемник сигнал, отношение S/N равняется

$\eta P_s / 2h\nu\Delta f$. Отсюда минимально обнаруживаемая мощность, определяемая при $S/N=1$, равняется

$$NEP = 2h\nu\Delta f / \eta = h\nu / \eta\tau, \quad (5)$$

где $\tau = 1/2\Delta f$ - постоянная фотоответа.

Таким образом, в идеальном случае за время τ при $\eta = 1$ можно регистрировать один фотон. Такое условие практически реализовать невозможно, и в общем случае обнаруживаемая мощность ограничивается шумами фона [3-5].

Приведенные значения отношения сигнал/шум представлены в полосе пропускания Δf измерительного устройства. Кроме того, прием фотоэлектрических сигналов ограничивается непосредственно шумами самого измерительного устройства, поэтому измерительная система должна обеспечивать существенное ослабление шумов на выходе, что может быть достигнуто применением радиометрических принципов измерения [2,7,9,10].

ИК-радиометры работают по следующему принципу [2,3,10]. Поток излучения, прерываемый механическим модулятором, фокусируется оптической системой на поверхность фотоприемника. Электрический сигнал, вырабатываемый фотоприемником, после предварительного усиления поступает на вход синхронного интегратора, выполняющего функцию узкополосного фильтра. Синхронный интегратор в значительной степени снижает уровень поступающих с входа шумов, пропуская модулированный сигнал практически без заметного ослабления. Далее сигнал после небольшого последующего усиления поступает на вход синхронного детектора, выпрямляется и поступает в систему записи. В принципе, при правильном выборе времени интегрирования сигнала с помощью радиометра можно обнаружить сигналы на несколько порядков слабее, чем его собственные шумы.

При этом фоновые шумы, обусловленные флуктуациями числа фотонов, падающих на поверхность фотоприемника от окружающих тел, становятся основными источниками шумов. Это обстоятельство является причиной для перехода к ИК-радиометрическим системам, в которых отсутствует механический модулятор [10]. Следует отметить также, что наличие механического модулятора в радиометрических системах создает существенное затруднение в подавлении электрических наводок и помех, вызываемых вращающимся двигателем, а также электрической схемой его запуска. Кроме того, использование механического модулятора излучения ограничивает возможности оптимального выбора частоты модуляции. Наконец, отсутствие механического модулятора может позволить выполнение всей электрической части радиометра в малогабаритном корпусе в виде единой большой интегральной схемы.

В работе приводится электрическая схема ИК-радиометра, в котором отсутствует механический модулятор. Функцию модулятора сигнала выполняет мост с двумя идентичными по всем параметрам фотоприемниками, включенными в параллельные плечи моста. При этом на один из приемников падает излучение сигнала и фона, а на другой – только излучение фона. При отсутствии сигнала мост предварительно

балансируется от фоновых засветок. Подбором идентичных по параметрам фотоприемников, а также эталонных сопротивлений моста предварительно проводится жесткая стабилизация баланса. Питание моста осуществляется непосредственно генератором опорных прямоугольных импульсов. С появлением ИК сигнала из-за разбаланса плеч моста на выходе появляется электрический сигнал, пропорциональный мощности падающего излучения. Дальнейшая обработка сигнала осуществляется обычными радиометрическими методами с существенными улучшениями как шумовых характеристик, так и стабильности всех каскадов системы.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ИК-РАДИОМЕТРА. На рисунке представлена принципиальная схема разработанного нами ИК-радиометра, во входном устройстве которого используются два одинаковых по всем параметрам фотоприемника R1 и R2, включенные в параллельные плечи мостовой схемы. При этом фотоприемник R1 регистрирует излучение полезного сигнала и фона, а фотоприемник R2 – только излучение фона. Мост питается однополярными симметричными импульсами. При отсутствии излучения, падающего на фотоприемник R1, мост балансируется переменным резистором R3, фотоприемник R2 служит для компенсации параметров фотоприемника R1 и фоновой засветки. Низкоомный резистор R4 служит для контроля чувствительности всего радиометра. Во время баланса моста R4 закорачивается. Балансировка моста от фонового излучения с помощью малошумящих сопротивлений с малыми значениями температурных коэффициентов сопротивлений и включение в параллельные плечи моста идентичных по параметрам фотоприемников одновременно способствуют сохранению баланса при изменении температуры окружающей среды. Разбаланс моста при падении измеряемого излучения на фотоприемник R1 приводит к появлению на выходе моста сигнала с амплитудой, пропорциональной мощности падающего излучения. При этом сигнал разбаланса по частоте и длительности соответствует сигналу, питающему мост. Поэтому рассматриваемую систему можно назвать “ИК-радиометром с внутренней модуляцией сигнала” [10].

Сигнал разбаланса моста, как видно из рисунка, усиливается специальным измерительным усилителем на основе операционных усилителей (ОУ) DA1-DA3 и параллельно включенных полевых транзисторов (ПТ) VT1-VT4 и VT5-VT8 для каждого из плеч моста [11]. Параллельное включение транзисторов приводит к тому, что среднее значение тока сигнала, передаваемого в нагрузку, увеличивается в n раз (n - число параллельно включенных транзисторов), а среднеквадратичное значение шумового тока увеличивается в $\sqrt{n}$ раз, т.к. эквивалентные шумовые “генераторы” некоррелированы [11]. При этом отношение сигнал/шум на выходе увеличивается в $\sqrt{n}$ раз. Параллельное включение ПТ можно представить в виде одного эквивалентного транзистора с крутизной $g_0 = g\sqrt{n}$ (g - крутизна одного транзистора) [12].

Согласно [13], подключение ПТ к инвертирующему входу ОУ можно рассматривать как единую каскадную схему с коэффициентом усиления $K_0 = gR$, где R - сопротивление обратной связи ОУ.

При использовании параллельно включенных ПТ коэффициент усиления всей каскадной схемы равен $K = K_0 \sqrt{n} = gR \sqrt{n}$.

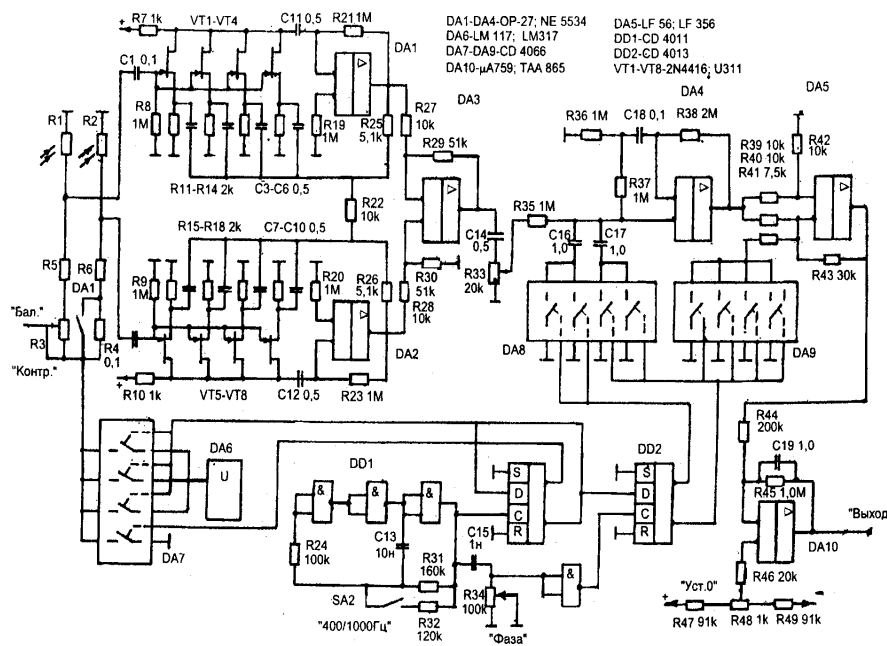


Рис. Электрическая схема ИК-радиометра с внутренней модуляцией сигнала

Следовательно, входной измерительный усилитель VT1-VT8 и DA1-DA3 представляет собой аналог симметричного разностного усилителя на трех ОУ [14], но с улучшенным отношением сигнал/шум (в нашем случае $n=4$). Далее сигнал (в виде меандра) с выхода измерительного усилителя на DA3 поступает на синхронный интегратор, выполненный на элементах C16, C17, R35 и аналоговом ключе DA8. По существу, синхронный интегратор является гребенчатым фильтром, частота настройки которого определяется частотой опорного сигнала, а ширина полосы составляющих "гребенки" - постоянной времени интегрирующих цепочек R35C16 и R35C17 ($\Delta f = 1/2\pi R35C16 = 0,16 \text{ Гц}$). При этом ширина полосы такого каскада соответствует ширине полосы, в которой содержится полезный сигнал. Так, в случае меандра гармоники сигнала ω_0 , $3\omega_0$, $5\omega_0$ подаются на выход практически без ослабления амплитуды гармоник с существенным подавлением амплитуд некоррелированных шумов [15].

Выигрыш в отношении S/N в синхронном интеграторе определяется тем, что при постоянной времени интегрирования $RC \gg T_0$ (T_0 – период входного сигнала) импульсы детерминированного сигнала суммируются арифметически, результирующая суммарная амплитуда сигнала возрастает в $N_0 = RC/T_0$ раз, а его энергия в N_0^2 раз. Флуктуационные помехи складываются по мощности, поэтому отношение S/N возрастает в N_0 раз (N_0 – число импульсов, просуммированных за время RC), т.е.

$$\frac{S}{N} \approx \frac{3RC}{T_0} \approx \frac{3.1c}{1/f_0} \approx 3.10^3$$

для выбранной частоты сигнала $f_0 = 1 \text{ кГц}$.

Таким образом, перегрузка шумами последующих каскадов в этом случае практически устраняется, и отфильтрованный от шумов сигнал через согласующий усилитель DA4 поступает на вход синхронного детектора на основе ОУ DA5 и коммутатора DA9. Далее продетектированный сигнал через усилитель постоянного тока на DA10 поступает на выход радиометра для конечной регистрации. Полоса пропускания ОУ на DA10 определяет полосу пропускания синхронного детектора. Переменный резистор R48 в схеме служит для подстройки нулевого уровня выходного сигнала радиометра во время баланса плеч входного моста.

Учитывая, что стабильность характеристик радиометра в значительной мере зависит от стабильности амплитуды импульсов питания входного моста, питание последнего осуществлялось прямоугольными импульсами со стабилизированной амплитудой. Для этого выход высокостабильного источника напряжения постоянного тока DA6 через аналоговый ключ DA7 периодически соединяется с входным мостом с частотой внутренней модуляции радиометра. Такое соединение обеспечивает питание моста стабилизированными импульсами напряжения с регулируемой амплитудой от 3 до 15 В со скважностью 2, что позволяет использовать в радиометре широкий класс фотоприемников. Аналоговые ключи моста, синхронного интегратора и синхронного детектора в схеме управляются импульсами от формирователя опорных сигналов на DD1 и DD2 с коррекцией фаз между импульсами питания моста, аналоговыми ключами синхронного интегратора и синхронного детектора. Коррекция фаз обеспечивается дифференцирующей цепочкой C15, R34, ячейками инвертора от DD1 и триггера DD2. Первые три инвертора DD1 представляют задающий генератор с частотой $f = 1/1,4R31C13$. Триггер DD2 выполняет деление частоты на 2 и тем самым формирует два симметричных импульса со скважностью 2, сдвинутых на 180° . Выходная частота триггера является рабочей частотой всего радиометра, равной 400 или 1000 Гц.

Приведенные значения частот были установлены еще Госстандартом СССР для ИК-радиометров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предлагаемая схема ИК-радиометра позволяет устранить фон при измерениях в ИК-области спектра и имеет существенные преимущества по сравнению с прежними разработками [10], а именно:

- снижение шумов предусилителя за счет каскадного включения транзисторов и операционного усилителя;
- более жесткая коррекция фаз опорного и полезного сигналов;
- дополнительная стабилизация амплитуды импульсов питания входного моста, синхронного интегратора и синхронного детектора;
- отсутствие общепринятого механического модулятора.

Следует отметить также, что рассматриваемый принцип приема и обработки фотоэлектрических сигналов относится к прямому фотодетектированию и по сравнению с гетеродинным принципом [16] имеет существенное преимущество по простоте и надежности практической реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Levinstein H., Mudler J.** Infrared Detector in Remote Sensing // Proc.IEEE.-1975.-V.68, ¹¹.-P. 6-16.
2. **Robinson B.F., Dewitt D.P.** Electro-optical Non-Imaging Sensors. Chapter 7, P. 293-333, 1983 (from: Manual of Remote Sensing, American Society of Photogrammetry, Sheridean Press, 1983.-378 p.).
3. **Kingston R.H.** Detection of Optical and Infrared Radiation.- New York, 1978. - 264 p.
4. **Сафронов Ю.П., Андрианов Ю.А.** Инфракрасная техника и космос . - М.: Советское радио, 1970.-248 с.
5. **Keyes R.J.** (Ed.) Optical and Infrared Detectors.-Berlin-Heidelberg.: Springer-Verlag, 1980.-351 p.
6. **Авдошин Е.С.** Световодные инфракрасные радиометры // Приборы и техника эксперимента.-1988.- ¹ 2.-С.5-24.
7. **Айгина Н.П., Варфоломеев С.П., Матвиенко А.В.** Военные области применения инфракрасной техники // Зарубежная электронная техника.-1980.- ¹ 9.- С.3-36.
8. **Harman T.C., Melnigailis I.** (From Infrared Measurements (Ed. by Wolfs R.)). 1974.- V.4.- P.1-94.-New York, London.: Acad.Press, 1974. – 215 p.
9. **Мирзабекян Э.Г., Абрамян Ю.А., Адамян З.Н., Арутюнян В.М., Симонян С.Г.** Высокочувствительный инфракрасный радиометр // ДАН АрмССР.-1977.-Т.34, ¹ 5.- С. 285-290.
10. **Abrahamian Ju.A., Adamian Z.N., Aroutiounyan V.M., Gasparyan F.V., Martirosian S.G.** An IR-Radiometer with Internal Signal Modulation // Int.J.of Infrared and Millimeter Waves.-1998.-V.19, ¹⁶.- P. 827-833.
11. **Bordoni F., Pallotino G.V.** Low Noise Preamplifier for Gravitational Research // Rev.Sci.Instrum.-1977.- V.48, ¹⁷.- P. 757- 761.
12. **Hallgren R.B.** Paralleled Transconductance Ultralow-Noise Preamplifier // Rev.Sci.Instrum.-1988.-V.59, ¹ 9.-P.2070-2074.
13. **Stefanovich D.** Ultralow Noise Preamplifier for High Impedance Infrared Bolometer // Rev.Sci.Instrum.-1973.- V.47, ¹ 2.- P.239- 240.
14. **Гутников В.С.** Интегральная электроника в измерительных устройствах.-М.: Энергия, 1980.- 248 с.

15. **Ипатов А.В., Берлин А.Б.** Низкочастотное входное устройство радиоастрономического приемника с синхронным интегратором // Изв.вузов. Радиофизика.-1973. - Т.16, ¹ 5.- С.712-715.
16. **Росс М.** Лазерные приемники .-М.: Мир, 1969.- 520 с.

Ин-т радиофизики и электроники НАН Армении, ЕГУ. Материал поступил в редакцию 15.06.1999.

**ՅՈՒ.Ա. ԱՔՐԱՀԱՄՅԱՆ, Կ.Ն. ՔՈՉԱՐՅԱՆ, Ս.Գ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ,
Զ.Ն. ԱԴԱՄՅԱՆ, Վ.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ֆ.Վ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ**

ՑԱԾԴ ԱՂՍՈՒԿՆԵՐՈՎ ԲԱՐՁՐ ԶԳԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԻԿ - ՌԱԴԻՈՄԵՏՐ

Ներկայացված է ԻԿ-ռադիոմետրի սխեմա, որը կարող է թույլ տալ մթնոլորտի $\lambda = 4,5 \dots 5; 8 \dots 13$ մկմ ալիքի երկարությամբ թափանցիկ պատուհաններում չափել ֆոտոընդունիչ սարքերի սեփական աղմուկներից շատ ավելի ցածր մակարդակի ֆոտոէլեկտրական ազդանշաններ: Ի տարբերություն համանման մշակումների, ներկայացվող սխեմայում լրացուցիչ լուծումներ են կիրառված նախաուժեղացուցչի աղմուկների ցածրացման, ֆոտոզգայուն կամրջակի սնող իմպուլսների լայնության կայունության, բազային և օգտակար ազդանշանների փուլերի ուղղման, ինչպես նաև համափուլ դետեկտորի բնութագրերի լավացման համար:

**Yu.A. ABRAHAMYAN, K.N. KOCHARYAN, S.G. MARTIROSSYAN,
Z.N. ADAMIAN, V.M. HAROUTYUNYAN, F.V. GASPARYAN**

LOWNOISE HIGH SENSITIVITY IR-RADIOMETER

An IR-radiometer circuit that allows to make weak photoelectric signal measurements is presented. It is on considerably lower level than the inherent noise of IR-detector systems for $\lambda = 4.5 \dots 5; 8 \dots 13 \mu$ in atmosphere transparency windows. Apart from similar developments, the supplementary solutions for decreasing preamplifier noise, the amplitude stabilization of photosensitive bridge feeding pulses, the basic and useful signal phase correction, as well the improvement of synchronous detector characteristics are applied in this circuit.