

УДК 681.2

Принцип построения автоматизированной следящей ИК-радиометрической системы

Величко А.П.*, Манзюк К.И., Резник К.Н.*****

*Московский государственный университет приборостроения и информатики,
МГУПИ, ул. Стромынка, 20, Москва, 107996, Россия*

*e-mail: aleksveli4ko@yandex.ru

**e-mail: manzyuk_k@mail.ru

***e-mail: k-reznik@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой инфракрасной системы наземного базирования, следящей за Солнцем в автоматическом режиме, определены конфигурация и основные характеристики такой установки, рассчитан кинематический узел, обеспечивающий необходимую точность наведения и сопровождения объекта.

Представляемая измерительная установка может быть интересна для специалистов и организаций, связанных с исследованием и прогнозированием метеорологической ситуации, а также с экологическим мониторингом в каком-либо регионе. Широкое применение такой аппаратуры совместно с другими метеорологическими системами обеспечит оперативный экоконтроль за состоянием приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: Солнце, наведение, слежение, измерение, погрешность, инфракрасная установка.

Целью разработки автоматизированной следящей ИК-системы является осуществление постоянного автоматического слежения (в дневное время) за

Солнцем и измерения его радиационной температуры с учетом перекрытия диаграммы направленности облаками. Это позволит при использовании соответствующего алгоритма расчета [1, 2] получить такие характеристики атмосферы и метеобъектов, как коэффициент пропускания оптически полупрозрачного облака $\tau_{обл}(\Delta\lambda)$, его оптическую плотность $D_{обл}(\Delta\lambda)$, оптическую толщину $h_{обл}$, а также коэффициент прозрачности атмосферы $\tau(\Delta\lambda, m)$, оптическую плотность атмосферы в спектральном диапазоне $\alpha(\Delta\lambda, m)$, фактор мутности атмосферы $T(\Delta\lambda, m)$.

Основные требования к такой следящей системе могут быть сформулированы следующим образом:

- диапазон измеряемых температур радиометра должен быть достаточен для регистрации максимальной температуры Солнца в зените при ясной безоблачной атмосфере ($\sim 5000\text{K}$);
- высокая точность измерения (с учетом радиационного вклада атмосферы);
- рабочий спектральный диапазон - в одном из окон прозрачности атмосферы;
- угловое поле радиометра должно быть меньше угловых размеров Солнца (это условие исключает зависимость регистрируемой температуры от положения диска Солнца в поле радиометра);
- точность наведения на Солнце и его последующего сопровождения должна всегда обеспечивать полное перекрытие поля радиометра диском Солнца;
- измерения проводятся непрерывно в течение дневного времени суток;

- процесс наведения на Солнце и последующего его сопровождения должен проходить автоматически;

- обработка первичных данных и последующий расчет радиационных характеристик атмосферы и метеообъектов должна производиться в режиме реального времени.

Проброобразом настоящей разработки явилась следящая ИК-радиометрическая установка [3], созданная коллективом кафедры МГУПИ.

Исходя из перечисленных выше требований, базовая следящая ИК-установка имела ряд недостатков: оптический канал наведения позволял работать в автоматическом режиме только при разорванной облачности и при небольших угловых размерах облаков; у применяемого ИК-пирометра угловое поле в несколько раз превышало угловые размеры Солнца, что сказывалось на погрешности результатов измерений; максимальный порог измеряемого диапазона составлял 500°C, что учитывая спектральный рабочий диапазон (8÷14 мкм) обязывал применять особые калиброванные компенсаторы; недостаточное быстродействие оптической системы наведения и сопровождения вызывала заметный периодический температурный уход (дрейф), который сложно было учитывать.

С учетом устранения отмеченных недостатков предлагается следующая схема построения следящей ИК-системы (рис. 1).



Рисунок 1 - Структурная схема следящей ИК-системы

Основой комплекса является ИК-пирометр ПИ-315Е, установленный на альт-азимутальной монтировке. Основные характеристики ИК-пирометра представлены в таблице 1.

Как видно из табл.1 измеряемый диапазон в таком пирометре значительно расширен в сторону высоких температур до 3273°K, а компенсации избыточного излучения при максимальной яркости Солнца можно добиться с помощью обычного нейтрального светофильтра, выполненного из оптического стекла, благодаря спектральному рабочему диапазону прибора. Для выбора марки нейтрального светофильтра необходимо по известной методике [3] определить коэффициент пропускания атмосферы в спектральном диапазоне 2,4 2,4мкм, который будет обусловлен в основном влиянием на солнечное излучение паров воды и углекислого газа (рис.2).

Таблица 1 - Основные технические характеристики прибора

Диапазон измеряемых температур	500 - 3000°С
--------------------------------	--------------

Точность	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ при температуре окружающего воздуха $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
Точность при повторных измерениях	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Время реакции	менее 200мсек
Рабочий спектральный диапазон	2,1-2,4 мкм
Коэффициент излучения	0,10-1,00
Оптическое разрешение (D:S)	120:1

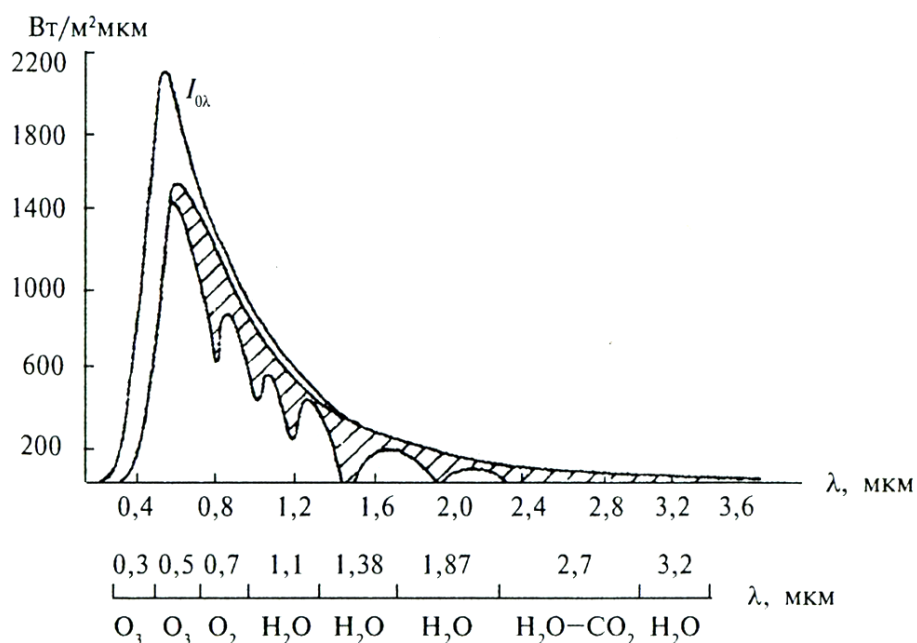


Рисунок 2 – Основные полосы поглощения излучения в атмосфере

Затем, рассчитав плотность потока излучения во входном зрачке пирометра от источника с температурой 5000°K и 3273°K [3], определяется коэффициент пропускания (оптическая плотность) нейтрального светофильтра. Для данного ИК-пирометра расчетным значениям соответствует светофильтр марки НС-3. Он будет

автоматически вводиться в оптическую схему при превышении максимально возможного потока для приемника радиометра и его характеристики учитываются при первичной обработке измеренных параметров.

По оптическому разрешению определяем угол поля ИК-пирометра:

$$2\varphi = 2\arctg(S/2D) \quad (1)$$

$$2\omega = 2\arctg\left(\frac{1}{2 \cdot 120}\right) = 8,333 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 28,65'.$$

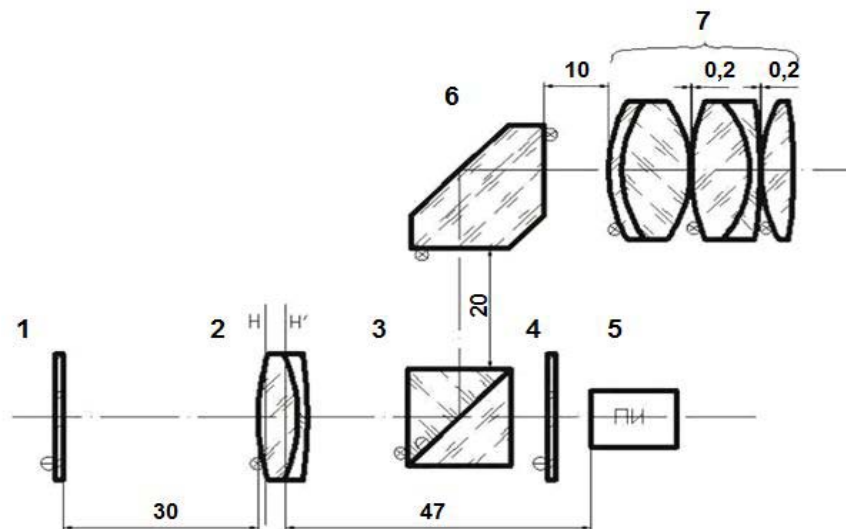
Наименьший угловой размер Солнца в афелии составляет $\gamma_c = 31,45'$. Т.е. еще одно требование для проектируемой системы соблюдено $2\omega < \gamma_c$. При этом суммарная погрешность системы при наведении и сопровождении объекта должна быть:

$$\delta_{\Sigma} = \pm\left(\frac{\gamma_c - 2\omega}{2}\right) = 1,4' \quad (2)$$

Оптическая схема ИК-пирометра представлена на рис. 3.

Для того чтобы система наведения и сопровождения не зависела от балльности облачности, необходимо отказаться от оптического канала и воспользоваться достаточно стабильными (в пределах оговоренной погрешности) «перемещениями» Солнца по небосклону (законами суточного обращения Земли вокруг своей оси и годового обращения Земли вокруг Солнца). Положение Солнца (как и других небесных тел) на небосклоне задается эфемеридами (экваториальными

координатами на текущий момент времени с учетом местоположения наблюдателя).



1 – светофильтр НС-3; 2 – объектив; 3 – полупрозрачная призма-куб; 4 – фильтр $d\lambda=2.1-2.4$ мкм; 5 – пироэлектрический приёмник излучения; 6 – призма $A_{KP}-90$;
7 – окуляр

Рисунок 3 – Оптическая схема ИК-радиометра Time Group TI 315E

Чтобы воспользоваться эфемеридами Солнца, необходимо:

- 1) разработать электроприводы азимутальный и угла места, позволяющие ориентировать установку с угловым разрешением меньшим, чем оговоренная суммарная погрешность δ_{Σ} ;
- 2) разработать программу управления электроприводами, позволяющую при введении исходных данных (координаты точки наблюдения, дата и текущее время) определить координаты Солнца на небосклоне, совместить оптическую ось системы

с этими координатами, запустить процесс измерения и обеспечить сопровождение Солнца во время измерений.

Рассчитаем электроприводы для ориентации и сопровождения наблюдаемого объекта. Поскольку точность наведения и сопровождения должна быть одинакова по двум координатам (в силу симметричности оптической системы радиометра относительно оптической оси), азимутальный электропривод и электропривод угла места должны быть идентичны.

Рассмотрим азимутальный электропривод.

Угловая скорость перемещения Солнца в азимутальной плоскости, обусловленная суточным вращением Земли вокруг своей оси:

$$\omega_{\text{зоп}} = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ рад} / \text{с} .$$

Весь кинематический узел должен располагаться (по конструктивным соображениям) в корпусе альт-азимутальной установки, размеры которой составляют 308 x 235 x 180 мм.

Для наведения и слежения с такой точностью за объектом, движущегося с очень малой угловой скоростью, и учитывая размеры корпуса электропривода в качестве исполнительного механизма последнего целесообразно выбрать шаговый двигатель, отвечающий поставленным требованиям.

Выбираем шаговый электродвигатель серии FL20STH – FL20STH30-0604A со следующими техническими характеристиками (таблица 2):

Таблица 2

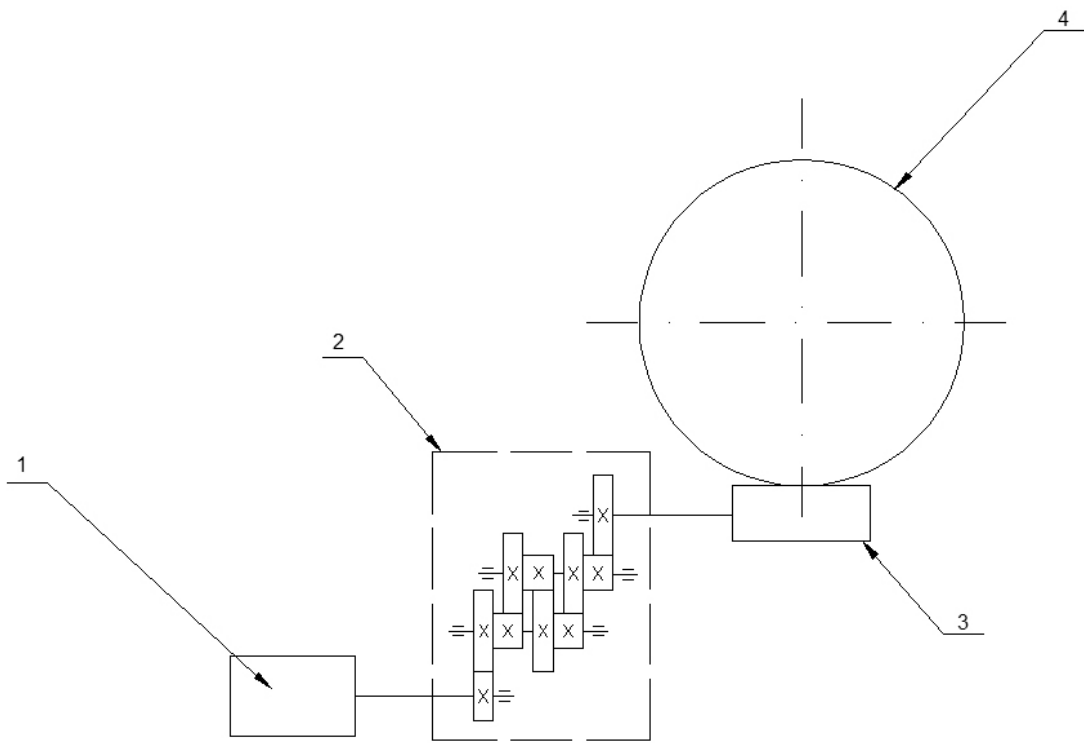
Модель	Угловой шаг	Погрешность углового шага	Рабочая температура	Напряжение питания	Ток/фаза	Крутящий момент	Количество выводов	Момент инерции ротора	Вес	Длина
	град	%	°С	В	А	Г·см	шт	кг·м ²	кг	мм
FL20STH30-0604A	1,8	±5	-20 ÷ +50	3,9	0,6	180	4	2·10 ⁻⁷	0,06	30

Кинематическую схему редуктора, сопрягающего исполнительный механизм (электродвигатель) с поворотной азимутальной плоскостью, выбираем исходя из требуемой точности: угловое разрешение привода ψ' должно быть меньше суммарной погрешности δ_{Σ} , тогда общее передаточное отношение азимутального редуктора $i_{ред.}$:

$$i_{ред} \leq \frac{\delta_{\Sigma}}{\alpha_{и}}, \quad (3)$$

где $\alpha_{и}$ - угловой шаг электродвигателя.

В редукторе используем зубчатые передачи. Предлагаемая схема редуктора представлена на рис. 4.



1 – двигатель, 2 – редуктор Z1 – Z10 (состоящий из 5 кинематических пар), 3 – червяк, 4 – колесо азимутальной плоскости

Рисунок 4 – Предлагаемая кинематическая схема азимутального редуктора

Характеристики зубчатых колес редуктора и кинематических пар приведены в таблице 3.

Общее передаточное отношение азимутального редуктора:

$$i_{ред} = i_{1,2} \cdot i_{3,4} \cdot i_{5,6} \cdot i_{7,8} \cdot i_{9,10} \cdot i_{11,12} = 1,21 \cdot 10^{-4} \quad (4)$$

Угловой шаг двигателя $\alpha = 1,8^\circ = 108'$.

Таблица 3

№ колеса	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12
Число зубьев	18	30	12	30	12	30	12	30	12	40	1*	95
Делительный модуль, мм	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1
Делительный диаметр	9	15	6	15	6	15	6	15	6	20		95
Передаточное отношение	0,6		0,4		0,4		0,4		0,3		0,0105	

* - Z11 - число витков (заходов) червяка.

Тогда с учетом передаточного отношения угловой шаг на выходе редуктора будет составлять:

$$\psi' = \alpha_{ш} \cdot i_{ред} = 0,013' \quad (5)$$

Т.е. разрешение такого азимутального электропривода на два порядка выше, чем максимально допустимая погрешность системы наведения и сопровождения.

Определим число импульсов, подаваемых на управляющие обмотки шагового двигателя, для обеспечения азимутального вращения измерительной системы с угловой скоростью $\omega_{гор}$.

Угловая скорость вала шагового двигателя должна составлять:

$$\omega_{ш.д.} = \frac{\omega_{гор}}{i_{ред}} \quad (6)$$

Частота вращения шагового двигателя (об/с):

$$n = \frac{\omega_{ш.д.}}{2\pi} = \frac{\omega_{гор}}{2\pi \cdot i_{ред}}. \quad (7)$$

Число шагов двигателя за 1 оборот составляет

$$N_1 = \frac{2\pi}{\alpha_{ш.д.}}. \quad (8)$$

Тогда время, необходимое для поворота вала шагового двигателя на 1 шаг, выраженное в секундах, будет равно

$$t_{ш} = \frac{60'' \cdot \pi \cdot i_{ред}}{30'' \cdot \omega_{гор} \cdot N_1} = \frac{\alpha_{ш.д.} \cdot i_{ред}}{\omega_{гор}}. \quad (9)$$

Частота управляющих импульсов

$$f_{имп} = \frac{1}{t_{ш}} = \frac{\omega_{гор}}{\alpha_{ш.д.} \cdot i_{ред}}, \quad (10)$$

где $\alpha_{ш.д.}$ - шаговый угол двигателя, выраженный в радианах.

Итак, $f_{\text{вМ}} = 19,12$, что значительно ниже частоты приемистости электродвигателя.

Вывод: азимутальный электропривод альт-азимутальной установки вместе с выбранным шаговым двигателем подходит по всем условиям в качестве азимутального электропривода следящей ИК-системы.

Как отмечено выше, аналогичный электропривод может быть использован и для угла места. Частота управляющих импульсов для шагового двигателя в этом случае будет еще меньше.

Как легко определить по рис. 4 и табл. 2, 3 габаритные размеры кинематического узла вполне вписываются в требуемые габариты.

Программа управления электроприводами разрабатывается с учетом полученных основных кинематических характеристик установки.

Библиографический список

1. Величко А.П., Мирсаитов С.Ф. Методика определения коэффициента прозрачности атмосферы в спектральном диапазоне 8-14 мкм. // Научные труды X Международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики". Сочи, 2007, С. 55-58.
2. Величко А.П., Буре А.С., Мирсаитов С.Ф. Алгоритм расчета плотности оптически полупрозрачных облаков. // Труды XVII МНТС «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». Алушта, Украина, 2008, С. 72.

3. Величко А.П., Гарипов В.К., Слепцов В.В., Шишков П.О. Системы дистанционного контроля параметров окружающей среды (атмосферы) на основе ИК-радиометрии. Концепция проектирования. -М.: Машиностроение, 2007. - 473 с.
4. Величко А.П. Разработка наземных средств дистанционного контроля атмосферы. // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. №5. С.116-123.