

## МАЛОГАБАРИТНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ГОЛОВКА САМОНАВЕДЕНИЯ, АДАПТИВНАЯ К УСЛОВИЯМ СБЛИЖЕНИЯ

© 2009 г. М. С. Гуревич

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

E-mail: gurevichms@airnet.ru

Показано, что при сближении с целью, когда многократно возрастают принимаемая оптической головкой самонаведения (ОГС) мощность излучения и угловой размер изображения цели, для обеспечения устойчивой работы ОГС с традиционно используемой в таких случаях адаптивной системой автоматической регулировки усиления (АРУ) необходимо соответствующим образом кодировать в выходном сигнале вращающегося фотоприемного устройства (ФПУ) угловую ошибку ОГС и параметр, характеризующий принимаемую ОГС мощность излучения. Кодирование в данном случае означает организацию изменения пропускания в каналы ФПУ излучения и, соответственно, параметров его выходного сигнала в зависимости от угловой ошибки либо путем выбора топологии ФПУ, либо путем изменения прозрачности маски на его входе. Показано, что эти коды при сближении могут измениться и в соответствии с ними должны изменяться и алгоритмы обработки сигналов.

*Ключевые слова:* оптическая когерентная томография, эндоскопические исследования, медицина, ранняя диагностика рака.

Коды OCIS: 350.4600, 280.0280, 150.5670, 230.0230.

Поступила в редакцию 23.04.2009.

Головки самонаведения, включая оптические, должны сопровождать цель и формировать сигнал управления носителем на всей траектории его движения вплоть до встречи с целью. Естественно, при сближении увеличивается угловой размер изображения цели в фокальной плоскости и многократно возрастает мощность принимаемого оптической головкой самонаведения (ОГС) излучения по сравнению с их значениями на дальности захвата цели. С возрастанием принимаемого излучения увеличивается коэффициент усиления контура слежения ОГС и для обеспечения ее устойчивой работы требуется его стабилизация в определенных пределах, обычно осуществляемая системой автоматической регулировки усиления (АРУ) или подобной ей по назначению системой. Таким образом ОГС адаптируется к изменяющимся при сближении с целью условиям. Однако это не всегда оказывается возможным.

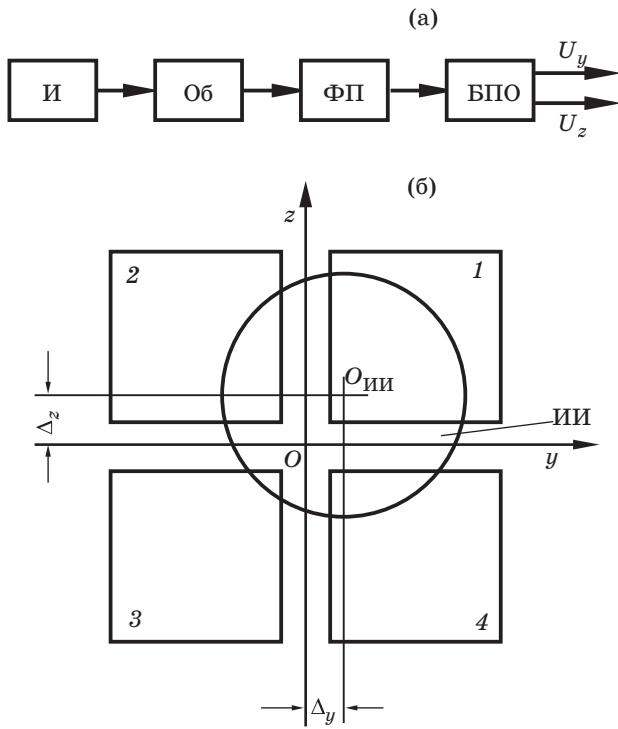
Выходной сигнал фотоприемника ОГС в принципе является единственным источником информации об угловой ошибке контура слежения для схемы формирования сигнала управления исполнительным механизмом и о принимаемой мощности излучения цели для схемы АРУ.

Вместе с тем в некоторых ОГС (в основном в ОГС с одним приемным каналом) эта информация не разделяется. Для ее разделения и последующего использования в ОГС должны быть приняты определенные меры. Естественным представляется применение различных кодов для угловой ошибки и принимаемой мощности излучения в сигнале с фотоприемного устройства (ФПУ).

Задача состоит в обосновании одного из принципов построения ОГС – выборе кода угловой ошибки в выходном сигнале ФПУ, которое обеспечивает формирование сигнала управления по ошибке и сигнала регулирования коэффициента усиления в системе АРУ для обеспечения устойчивой работы ОГС при сближении. Далее рассмотрены примеры устройств кодирования и декодирования в малогабаритных ОГС.

На рис. 1а приведена функциональная схема ФПУ моноимпульсной ОГС, а на рис. 1б – фокальная плоскость объектива и связанная с ней система координат.

На рис. 1б показано изображение излучателя в виде круга, на площади которого принятое излучение распределено равномерно. В блоке предварительной обработки (БПО) сигналы  $U_y$



**Рис. 1.** Функциональная схема ФПУ (а) и фокальная плоскость объектива моноимпульсной ОГС (б). И – излучатель, Об – объектив, ФП – фотоприемник, БПО – блок предварительной обработки,  $U_y$ ,  $U_z$  – составляющие сигнала управления;  $\Delta_y$ ,  $\Delta_z$  – составляющие угловой ошибки;  $oyz$  – система координат, ИИ – изображение излучателя,  $O_{ИИ}$  – центр ИИ, 1, 2, 3 и 4 – квадранты.

и  $U_z$  формируются схемой отношений путем суммарно-разностной обработки сигналов с площадок фотоприемника (ФП) и определяются уравнениями

$$U_y = [(U_1 + U_4) - (U_2 + U_3)] / (U_1 + U_2 + U_3 + U_4), \quad (1)$$

$$U_z = [(U_1 + U_2) - (U_3 + U_4)] / (U_1 + U_2 + U_3 + U_4), \quad (2)$$

где  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  – сигналы с соответствующих площадок ФПУ (квадрантов).

Каждый из сигналов пропорционален площади, занимаемой изображением излучателя (ИИ) на соответствующей площадке. При сближении радиус круга ИИ увеличивается. Пропорционально масштабному коэффициенту  $k_m$ , характеризующему соответствие сигналов на выходе ФПУ принимаемой мощности излучения, вырастают и сигналы, снимаемые с каждой площадки ФП. Поэтому величины  $U_y$  и  $U_z$  инвариантны к изменению размеров ИИ и принимаемой ФП

мощности излучения. Гипотеза о представлении ИИ в форме круга и равномерном распределении в нем принимаемого излучения является основанием для кодирования угловых величин  $\Delta_y$  и  $\Delta_z$ , соответствующих в системе отсчета  $oyz$  координатам совпадающих друг с другом в данном случае геометрического и энергетического центров ИИ. Получаемые при декодировании величины  $U_y$  и  $U_z$  связаны с величинами  $\Delta_y$  и  $\Delta_z$  масштабными коэффициентами. Масштабный коэффициент связывает также  $k_m$  и величину  $U$ , равную сумме сигналов со всех четырех площадок ФПУ,

$$U = \sum_{i=1}^4 U_i. \quad (3)$$

В данном примере код угловой ошибки, в том числе и ее составляющих  $\Delta_y$  и  $\Delta_z$ , определяется топологией ФП, а сигнал, пропорциональный принимаемой мощности излучения, от угловой ошибки не зависит.

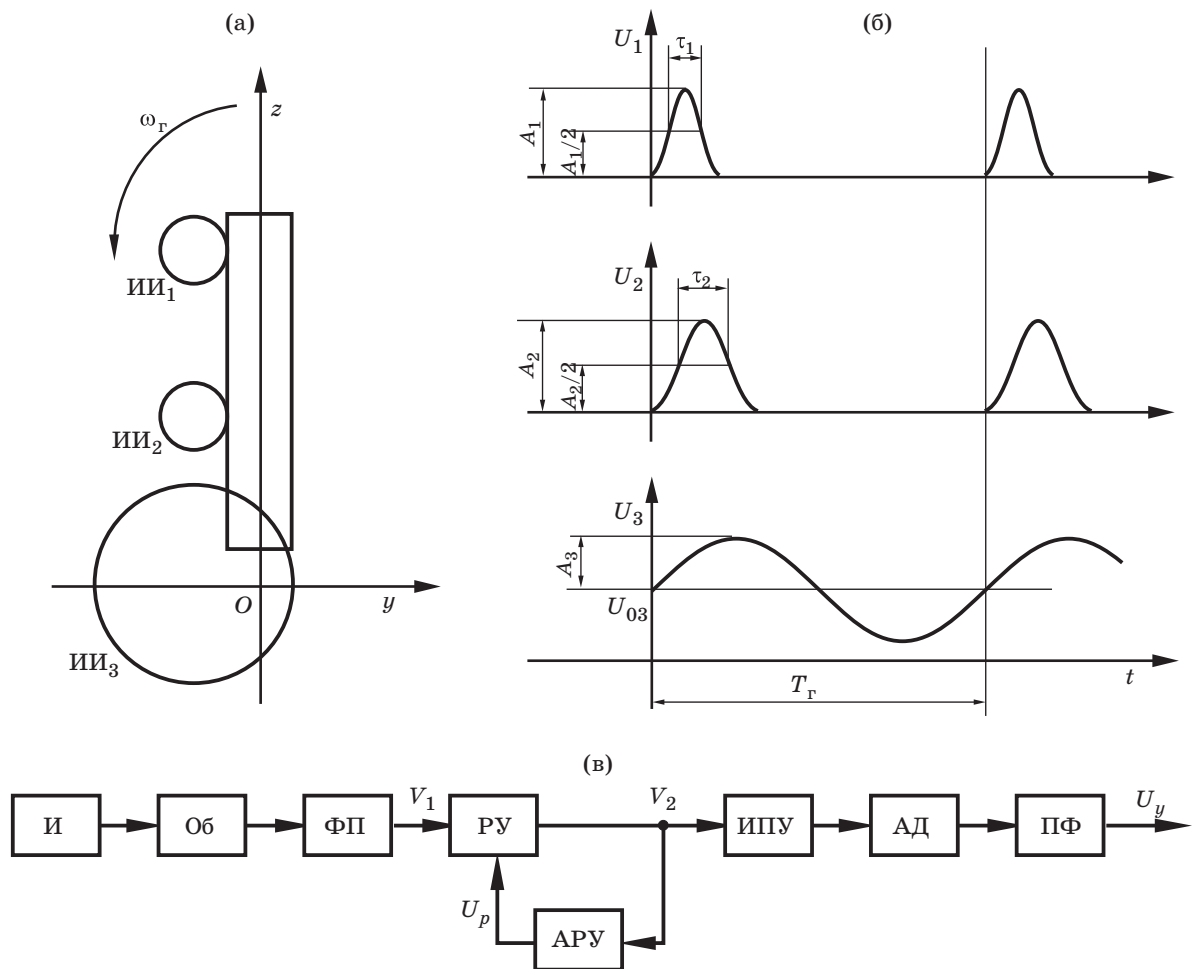
Такая ситуация может считаться правилом.

Рассмотрим пример, относящийся к исключениям из данного правила, иллюстрирующий необходимость использования более сложных кодов угловой ошибки ОГС в зависимости от условий сближения с целью. На рис. 2а показана фокальная плоскость объектива пассивной ОГС с установленной на магнитном роторе гироскопа фотооптической системой; на рис. 2б – выходные сигналы ФП от соответствующих излучателей, на рис. 2в – схема формирования сигнала управления прецессией ротора – магнита.

Из рис. 2 видно, что информация об угловом отклонении  $\Delta$  центра изображения точечного излучателя от центра  $O$  поля обзора, формируемого вращающимся ФП с круговой частотой  $\omega_r$  (или с периодом  $T_r$ ), содержится в длительности  $\tau$  или скважности ( $T_r/\tau$ ) импульса на выходе ФП.

В [1] показано, что при представлении изображения точечного излучателя в виде круга диаметром, равным ширине радиально расположенной вращающейся площадки ФП, форма импульса на выходе ФП близка к косинус-квадратной (термин взят из [2]). Таким образом, во всех точках поля обзора (за исключением граничных условий вблизи центра и края) величина  $\tau$  обратно пропорциональна величине  $\Delta$ . Следовательно, угловая ошибка ОГС закодирована в длительности импульса на выходе ФП.

Для каждого значения  $\Delta = \text{const}$  выходной сигнал ФП представляет собой во времени последовательность импульсов, следующих на частоте  $\omega_r$ . С увеличением  $\Delta$  значение амплитуды импульса  $A_{И}$  остается неизменным, а сред-



**Рис. 2.** Фокальная плоскость объектива (а), сигналы с фотоприемника (б) и функциональная схема блока формирования сигнала управления ОГС (в). ИИ<sub>1</sub>, ИИ<sub>2</sub>, ИИ<sub>3</sub> – изображения излучателя; ФП – фотоприемник,  $\omega_r$  – круговая частота вращения ФП,  $oyz$  – система отсчета координат;  $U_1, U_2, U_3$  – сигналы с ФП;  $U_{03}$  – среднее значение сигнала  $U_3$ ,  $T_r$  – период вращения ФП; И – излучатель, Об – объектив, РУ – регулируемый усилитель,  $V_1, V_2$  – входной и выходной сигналы РУ;  $U_p$  – сигнал регулирования усиления, АРУ – цепь автоматической регулировки усиления, ИПУ – избирательный предварительный усилитель, АД – амплитудный детектор, ПФ – полосовой фильтр.

нее значение их последовательности  $A_{cp}$  уменьшается. Следовательно, угловая величина  $\Delta$  закодирована и в параметре  $A_{cp}$ . На рис. 2б амплитуды импульсов указаны под номерами соответствующих изображений излучателей (см. рис. 2а). С увеличением принимаемой мощности излучения (коэффициента  $k_m$ ) пропорционально увеличиваются  $A_{и}$  и  $A_{cp}$ .

При формировании сигнала управления  $U_y$  необходимо реализовать зависимость

$$U_y = k \Delta, \quad (4)$$

где

$$k = k_m k_p, \quad (5)$$

а  $k_p$  – коэффициент усиления регулируемого усилителя (РУ).

При этом необходимо, чтобы при многократном увеличении  $k_m$  относительно начального значения  $k_{0m}$  величина  $k$  не превышала допустимого значения. На рис. 2в приведена схема одного из вариантов реализации зависимостей (4) и (5). Выходной сигнал регулируемого усилителя поступает на избирательный предварительный усилитель (ИПУ). Огибающая сигнала ИПУ меняется в зависимости от  $\Delta$ . Далее огибающая выделяется амплитудным детектором и поступает на вход полосового фильтра, настроенного на частоту  $\omega_r$ . Определяющими вид зависимости амплитуды первой гармоники сигнала  $U_y$  от  $\Delta$  при  $k = \text{const}$  являются параметры ИПУ – резонансная частота и полоса пропускания. Они выбираются таким образом, чтобы при известном коде величины  $\Delta$  (зависимости  $\tau = f(\Delta)$ ) и

номинальном значении периода  $T_r$  была реализована операция декодирования. Выделение огибающей и затем ее первой гармоники, очевидно, являются вспомогательными операциями.

Далее рассмотрим (4) и (5) при условиях, что сигнал  $U_p$  формируется либо при  $A_{и} = \text{const}$ , либо с учетом того, что  $A_{ср} = \alpha/\Delta$  (при  $\alpha = \text{const}$ ). Здесь важно оценить эффект убывания зависимости  $A_{ср}$  можно представить в виде  $A_{ср} = A_{0ср} - \alpha\Delta$ . Эти условия реализуются при установке в цепь АРУ либо пикового детектора, либо детектора среднего значения. Обозначим как  $A_1$  и  $A_2$  соответственно информативные для системы АРУ составляющие сигналов  $V_1$  и  $V_2$  на входе и выходе РУ. При этом возможно, что

$$A_1 = k_M A_{и} \quad (6a)$$

или

$$A_1 = k_M (A_{0ср} - \alpha\Delta). \quad (6б)$$

Далее имеем

$$A_2 = k_p A_1, \quad (7)$$

$$U_p = k_{oc} A_2 - E_3 \quad (\text{при } k_{oc} A_2 > E_3), \quad (8)$$

где  $k_{oc}$  и  $E_3$  – коэффициент усиления обратной связи и зона нечувствительности цепи АРУ.

Очевидно, что так как  $k_M$  возрастает при сближении, то функция  $k_p = f(U_p)$  должна быть убывающей. В первом приближении примем

$$k_p = k_0 - \beta U_p \quad (\text{при } k_0 = \text{const}, \beta = \text{const}), \quad (9)$$

где  $k_0$  – начальное значение коэффициента усиления РУ.

При условии (6a) после подстановки последовательно (6a) в (7), (7) в (8) и (8) в (9) получаем

$$k_p = k_0 - \beta(k_{oc} k_p k_M A_{и} - E_3). \quad (10)$$

После преобразований имеем

$$k_p = (k_0 + \beta E_3) / (1 + \beta k_{oc} k_M A_{и}). \quad (11)$$

Наконец, после подстановки (11) в (5) получаем выражение для стабилизированного с помощью системы АРУ коэффициента усиления ОГС при условии, что амплитуда выходного сигнала фотоприемника не зависит от угловой ошибки, что очевидно,

$$k = k_M (k_0 + \beta E_3) / (1 + \beta k_{oc} k_M A_{и}). \quad (12)$$

При выполнении аналогичных преобразований с (6б) получим

$$k = k_M (k_0 + \beta E_3) / (1 + \beta k_{oc} k_M (A_{0ср} - \alpha\Delta)). \quad (13)$$

Величина  $\Delta$ , как показано в [3], считается эквивалентной ошибкой, соответствующей сумме векторов амплитуд составляющих спектра ошибки  $\Delta$ , под действием которых формируется сигнал управления, обеспечивающий установившийся режим слежения с постоянной угловой скоростью. При этом

$$\Delta_{экр} = \Omega_{уст} / D, \quad (14)$$

где  $\Omega_{уст}$  – угловая скорость, отслеживаемая ОГС в установившемся режиме;  $D$  – добротность, или коэффициент усиления разомкнутого контура ОГС.

Вместе с тем при высокой частоте  $\omega_r$  в первом приближении  $\Delta_{экр}$  можно представить в виде

$$\Delta = \Omega_{уст} / D, \quad (15)$$

а  $D$  – в виде

$$D = k B_0, \quad (16)$$

где  $B_0 = \text{const}$ .

После подстановки (15) в (13) имеем

$$k = D k_M (k_0 + \beta E_3) / [(1 + \beta k_{oc} k_M A_{0ср}) D - \beta k_{oc} k_M \alpha \Omega_{уст}]. \quad (17)$$

Учитывая (16), из (12) и (17) получим выражения для добротности

$$D = C_0 k_M / (1 + d_0 k_M), \quad (18)$$

где

$$C_0 = B_0 (k_0 + \beta E_3), \quad d_0 = \beta k_{oc} A_{и},$$

$$D = [C_0 + C_1 \Omega_{уст}] k_M / (1 + d_1 k_M), \quad (19)$$

а

$$C_1 = \beta k_{oc} \alpha, \quad d_1 = \beta k_{oc} A_{0ср}.$$

Таким образом, если сигнал, используемый для регулирования коэффициента усиления ОГС с АРУ, при возрастании угловой ошибки ОГС не возрастает, то добротность ОГС с увеличением принимаемой мощности излучения стабилизируется; если этот сигнал убывает, то добротность ОГС с увеличением принимаемой мощности излучения также стабилизируется, но возрастает с увеличением отслеживаемой угловой скорости.

Последнее полезно, так как при малых добротностях улучшается качество отслеживания малых угловых скоростей, а при больших добротностях увеличивается запас по углу по отношению к краю поля зрения ОГС при отслеживании больших угловых скоростей.

Обратимся вновь к рис. 2. В ближней к цели зоне в ОГС формируются сигналы от размерного

излучателя, изображение  $ИИ_3$  которого, расположенное в центральной части поля обзора, приведено на рис. 2а, а сам сигнал  $U_3$  – на рис. 2б. Очевидно, что сигнал  $U_3$  в отличие от сигналов от точечного излучателя не импульсный, а близок к смещенному синусоидальному. Амплитуда первой гармоники сигнала  $U_3$  пропорциональна величине  $\Delta$ . При этом в функциональной схеме на рис. 2в последовательно соединенные блоки ИПУ и АД оказываются лишними, если ПУ центрирует поступающий сигнал.

Изображения любой (например воздушной) цели в зависимости от угла визирования будут отличаться по форме и распределению энергии друг от друга и изображения в виде круга. Вместе с тем общим для них является то, что, начиная с некоторой дальности до цели, в центральной части поля обзора ОГС в выходном сигнале ФП в первом приближении амплитуда первой гармоники на частоте  $\omega_T$  пропорциональна ошибке, а среднее значение от нее не зависит. При этом с уменьшением дальности эта часть поля обзора увеличивается.

Следовательно, в ближней к цели зоне изменяется код величины  $\Delta$  в выходном сигнале ФП. Изменяется при этом и код сигнала на входе системы АРУ. Здесь в цепи АРУ необходимо использовать детектор среднего значения  $U_{03}$  сигнала  $U_3$ .

Отметим, что в центральной зоне поля обзора, когда угловая ошибка меньше радиуса изображения  $ИИ_3$ , величина  $U_{03}$  не зависит от  $\Delta$ , а затем с возрастанием  $\Delta$  убывает. Таким образом, добротность ОГС в центральной зоне характеризуется зависимостью (18), а вне ее – зависимостью (19). При этом в (18) вместо  $A_{\text{ц}}$  необходимо подставить  $A_{0\text{ср}}$ .

Отметим также, что в ряде используемых в ОГС фотоприемных устройств в среднем значении выходного сигнала ФП недопустимо велика паразитная составляющая. Поэтому и в ближней к цели зоне выходной сигнал ФП центрируется (например путем дифференцирования). Из центрированного сигнала  $U_3$  сигнал  $A$  на входе

системы АРУ для регулирования коэффициента  $k_p$  можно сформировать только при условии

$$A = \alpha\Delta. \quad (20)$$

При выполнении с (20) преобразований, аналогичных выполненным с (6б), получим

$$D = k_M(C_0 - C_1 \Omega_{\text{уст}}). \quad (21)$$

Таким образом, добротность системы с АРУ оказывается пропорциональной мощности принимаемого излучения, что при сближении приводит к автоколебаниям и срыву слежения.

Следовательно, при построении систем с АРУ необходимо учитывать характер зависимости используемого в АРУ сигнала от ошибки системы.

## Заключение

Зависимость сигнала управления от угловой ошибки нелинейная и может быть аппроксимирована некоторой ломаной. Крутизна каждого из участков этой ломаной, в свою очередь, зависит от конкретных размера и формы излучателя и распределения его излучения, топологии ФП, а также алгоритма обработки и формирования из сигнала ФП сигнала управления и характеризуется одним из выражений (18), (19) или (21), позволяющих предварительно оценить приемлемость принятых технических решений с позиций качества работы ОГС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич М.С., Еськин В.Н., Чупраков А.М., Шустов Н.Ю. Трехспектральный координатор для оптической головки самонаведения // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 9. С. 54–57.
2. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977. С. 350.
3. Гуревич М.С. Влияние частоты модуляции принимаемого излучения на динамические характеристики оптической головки самонаведения // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 9. С. 92–96.