

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 врачающегося 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 изменяться 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 принятное излучение распределено равномерно. В блоке предварительной обработки (БПО) сигналы U_y

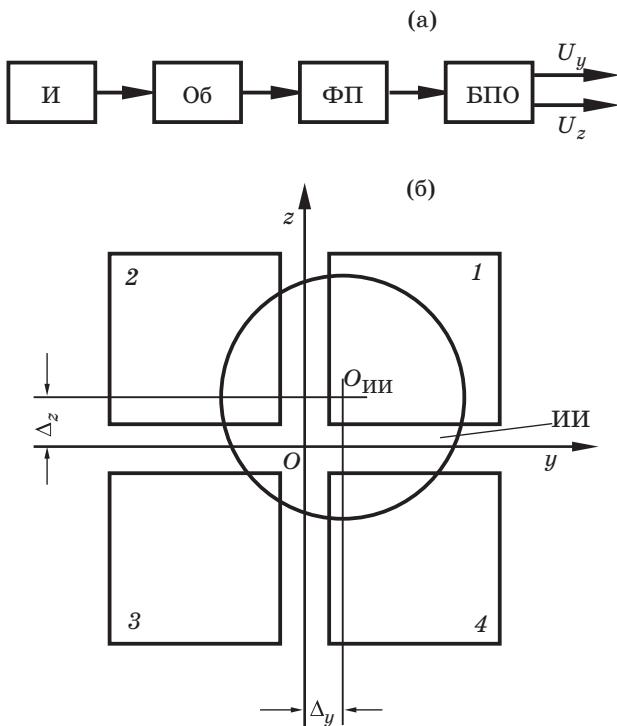


Рис. 1. Функциональная схема ФПУ (а) и фокальная плоскость объектива моноимпульсной ОГС (б). И – излучатель, Об – объектив, ФП – фотоприемник, БПО – блок предварительной обработки, U_y , U_z – составляющие сигнала управления; Δ_y , Δ_z – составляющие угловой ошибки; o_yz – система координат, ИИ – изображение 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 Δ_y и Δ_z , соответствующих в системе отсчета o_yz 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 Δ_y и Δ_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 Δ_y и Δ_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 гирокомпенсаторной 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 Δ центра изображения точечного излучателя от центра O поля обзора, формируемого вращающимся ФП с круговой частотой ω_r (или с периодом T_r), содержится в длительности τ или скважности (T_r/τ) 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 τ обратно пропорциональна величине Δ . 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 ω_r . С увеличением Δ значение амплитуды импульса A_Δ остается неизменным, а сред-

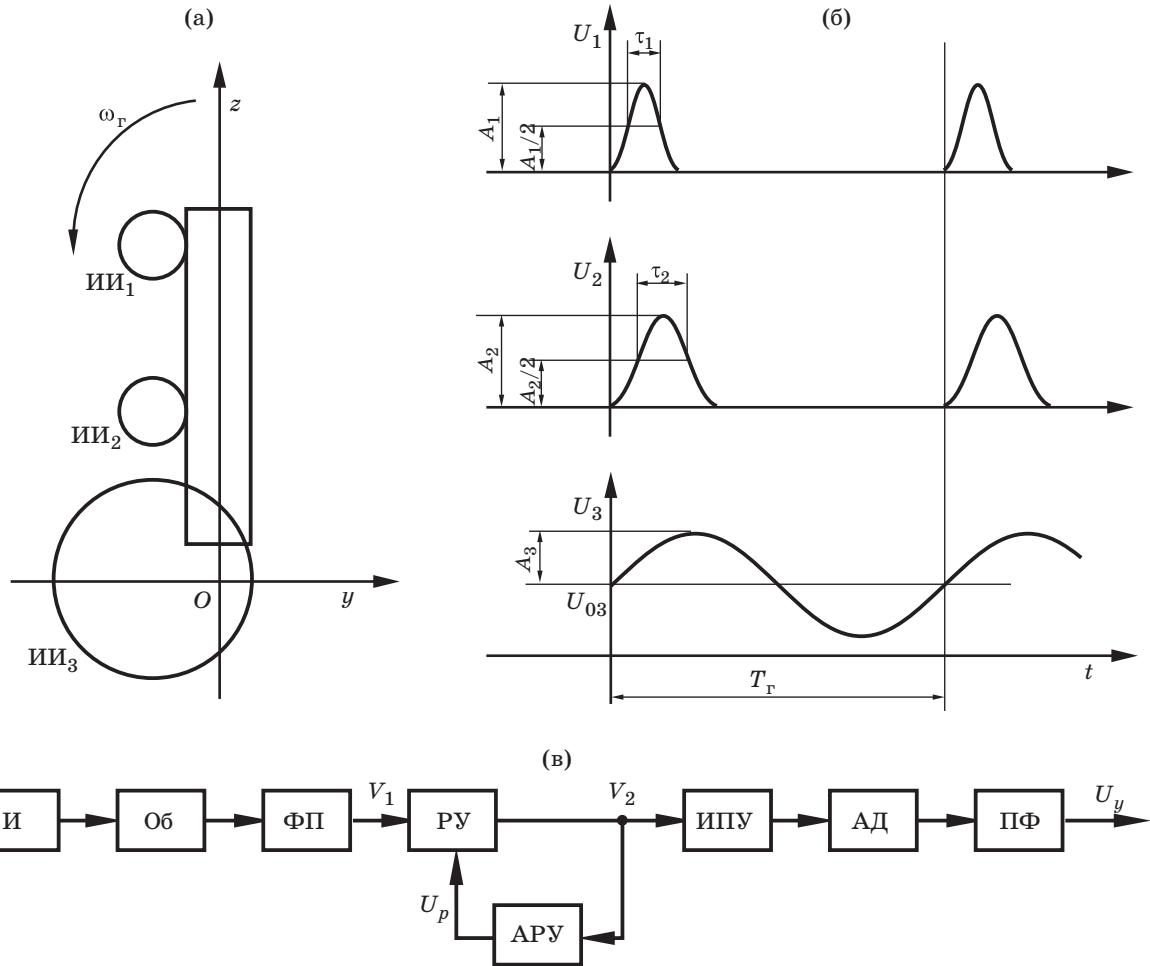


Рис. 2. Фокальная плоскость объектива (а), сигналы с фотоприемника (б) и функциональная схема блока формирования сигнала управления ОГС (в). ИИ₁, ИИ₂, ИИ₃ – изображения излучателя; ФП – фотоприемник, ω_r – круговая частота вращения ФП, оу_з – система отсчета координат; U_1 , U_2 , U_3 – сигналы с ФП; U_{03} – среднее значение сигнала U_3 , T_g – 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 Δ 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_u 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 Δ . Далее огибающая выделяется амплитудным детектором и поступает на вход полосового фильтра, настроенного на частоту ω_r . Определяющими вид зависимости амплитуды первой гармоники сигнала U_y от Δ при $k = \text{const}$ являются параметры ИПУ – резонансная частота и полоса пропускания. Они выбираются таким образом, чтобы при известном коде величины Δ (зависимости $\tau = f(\Delta)$) и

номинальном значении периода T_g 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 $A_i = \text{const}$, либо с учетом того, что $A_{cp} = \alpha/\Delta$ (при $\alpha = \text{const}$). Здесь важно оценить эффект убывания зависимости. Поэтому в первом приближении зависимость A_{cp} можно представить в виде $A_{cp} = A_{0cp} - \alpha\Delta$. 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

$$A_1 = k_m A_i \quad (6a)$$

или

$$A_1 = k_m (A_{0cp} - \alpha\Delta). \quad (6b)$$

Далее имеем

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

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

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

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

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

$$k_p = k_0 - \beta(k_{oc} k_p k_m A_i - E_3). \quad (10)$$

После преобразований имеем

$$k_p = (k_0 + \beta E_3) / (1 + \beta k_{oc} k_m A_i). \quad (11)$$

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,

$$k = k_m (k_0 + \beta E_3) / (1 + \beta k_{oc} k_m A_i). \quad (12)$$

При выполнении аналогичных преобразований с (6b) получим

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

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

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

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

Вместе с тем при высокой частоте ω_g в первом приближении $\Delta_{\text{экв}}$ можно представить в виде

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

а D – в виде

$$D = kB_0, \quad (16)$$

где $B_0 = \text{const}$.

После подстановки (15) в (13) имеем

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

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

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

где

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

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

а

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

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 размежного

излучателя, изображение ИИ₃ 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 Δ . 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 ω_r 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 Δ 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 ИИ₃, величина U_{03} не зависит от Δ , а затем с возрастанием Δ убывает. Таким образом, добротность ОГС в центральной зоне характеризуется зависимостью (18), а вне ее – зависимостью (19). При этом в (18) вместо A_i необходимо подставить A_{0cp} .

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

$$D = k_m(C_0 - C_1 \Omega_{ust}). \quad (21)$$

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.