

## ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ДЕФЛЕКТОРА ТЕПЛОПЕЛЕНГАТОРА В РЕЖИМЕ АНТИСКАНА

В.В. Крыжановский, В.Л. Левшин, Б.О. Берников

ОАО “НПП “Геофизика-Космос”, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва  
e-mail: boris.bernikov@gmail.com

*Изложена приближенная теория работы дефлектора в режиме антисканирования, при этом преследуется цель максимизации использования времени кадра на экспозицию “смотрящей” матрицы фотоприемника в составе обзорного широкополосного теплопеленгатора за счет высокого быстродействия малогабаритного дефлектора с зеркалом на роторе и электромагнитным моментным двигателем. Выявлены потенциальные возможности двухконтурной динамической системы с непрерывным движением силового контура и остановами линии визирования за счет дефлектора, обеспечивающего асимметричные колебания линии визирования в противофазе с основным контуром.*

**Ключевые слова:** дефлектор, антискан, теплопеленгатор, синхронизация сканирующих зеркал.

## APPROXIMATE ANALYSIS OF DYNAMICS OF MOTION OF THERMAL DIRECTION-FINDER DEFLECTOR IN THE ANTI-SCAN MODE

V.V. Kryzhanovskiy, V.L. Levshin, B.O. Bernikov

ОАО NPP Geofizika-Kosmos, Moscow, Bauman Moscow State Technical University, Moscow  
e-mail: boris.bernikov@gmail.com

*An approximate theory of the deflector operation in the anti-scanning mode is set forth. Here a goal is pursued to use maximally the frame time for exposure of staring array of photodetector (included in the surveillance wide-band thermal direction finder) owing to the high operating speed of the small-size deflector with a mirror on the rotor and with an electromagnetic moment motor. The potential possibilities are revealed for the two-loop dynamic system with continuous motion of the force loop and with line-of-sight stops at the expense of the deflector that provides the asymmetric oscillations of the line-of-sight, which are in anti-phase with respect to the main loop.*

**Keywords:** deflector, anti-scanning mode, thermal direction finder, scanning mirror synchronization.

**Исходные положения.** В теплопеленгаторах (ТП) с широким полем обзора (ОП) при использовании матричных “смотрящих” фотоприемных устройств (МФПУ) прибегают к пошаговому (дискретному) режиму обзора. Когда время кадра  $T_k$  жестко ограничено, важно, чтобы время накопления  $T_n$  (экспозиция) МФПУ составляло как можно большую часть времени кадра.

Одноконтурный электромеханический привод, несущий на себе входное зеркало достаточно большого размера, имеет соответственно высокие значения инерционного момента вращения нагрузки  $I_n$ . Создание моментного двигателя с большим значением момента вращения на валу  $M_{вр}$ , работающего в самом тяжелом “старт–стоп” режиме, в

этих условиях становится технической проблемой. Требуемое значение максимального ускорения зеркала рассчитывается по формуле

$$\ddot{\Omega}_m = M_{вр}/I_H,$$

где  $M_{вр}$  — момент вращения на валу двигателя;  $I_H$  — инерционный момент вращения нагрузки. Динамические требования к такому двигателю оказываются непомерно жесткими.

Решить такую техническую проблему можно с переходом на квазинепрерывный скан силовой части привода и остановом скана оптическим антискановым движением малого колеблющегося в пределах углового поля зрения ОТП зеркала [1]. Подобное устройство, именуемое дефлектором ТП (Д-ТП), помещается в узком сечении сходящегося в фокальной плоскости объектива ТП пучка лучей. Условная схема приведена на рис. 1.

Для обеспечения требуемой экспозиции  $T_3$  в режиме антисканирования необходимо чтобы на время  $T_3 = \tau_n < T_k$  скорости движения линии визирования от первого основного (силового) контура  $\dot{\Omega}_{о.к}$  и второго дефлекторного  $\dot{\Omega}_д$  контура были равны по модулю и противоположны по знаку:

$$\dot{\Omega}_{о.к} = -\dot{\Omega}_д \text{ или } \dot{\Omega}_\Sigma = \dot{\Omega}_{о.к} + \dot{\Omega}_д = 0.$$

При этом период колебаний зеркала Д-ТП соответствует  $T_k$  и отличается от него на время разгона перед накоплением  $t_{р.н}$  и время возврата  $t_в$  (рис. 2):

$$t_{р.н} + \tau_n + t_в = T_k.$$

Поскольку зеркало Д-ТП имеет малые значения  $I'_H$ , а крутящий момент его привода с уменьшением размеров зеркала падает в меньшей степени по отношению к основному приводу, имеет место ощутимый выигрыш по максимальному ускорению

$$\ddot{\Omega}' = M'_{вр}/I'_H \gg \ddot{\Omega}_m.$$

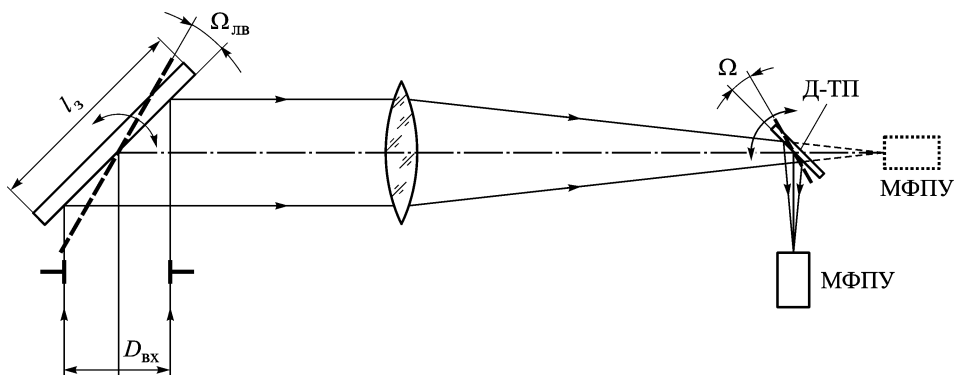
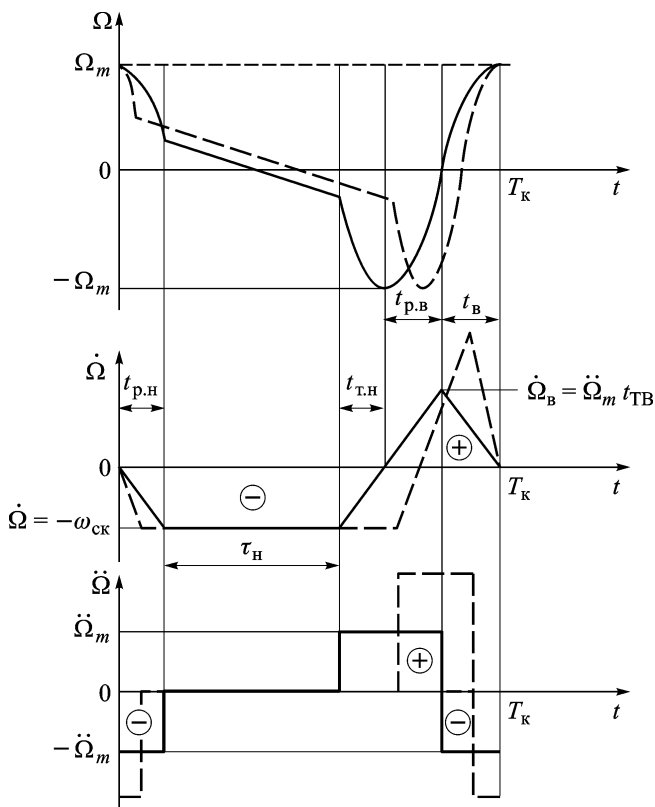


Рис. 1. Схема реализации двухконтурного привода скана с использованием Д-ТП



**Рис. 2.** Временные диаграммы движения Д-ТП в режиме асимметричных колебаний с участком постоянной скорости

Этим обусловлен выигрыш в коэффициенте использования времени кадра  $\eta_d$  на экспозицию  $\eta_d \rightarrow 1$ :

$$\eta_d = \tau_H / T_K.$$

Подобное устройство имеет смысл использовать в широкополных обзорных пеленгаторах, где реверс основного зеркала на краях поля обзора из-за его кратковременности по отношению к длительности скана по строке не будет играть особой роли.

**О выборе вида Д-ТП.** Дефлексия оптического луча может основываться на различных оптических эффектах:

- электромагнитном вращении зеркала (гальванодефлектор — ГД);
- электрооптическом (эффект Керра);
- акустико-оптическом;
- пьезоэлектрическом.

Второй и третий эффект отличаются высоким быстродействием, избыточным в данном случае, вместе с тем они отличаются большой сложностью, стоимостью реализации, избирательностью по длинам волн и низким световым пропусканием.

Пьезодефлекторы, как правило, наоборот, слишком инерционны. Поэтому выбор сводится к конкретным видам гальванодефлекторов, построенных по принципу обратного гальванометра.

Среди них выделяют два основных варианта: макро и микро. Первые делаются в виде зеркала на роторе с соленоидной обмоткой и постоянного магнита на статоре и имеют размеры зеркала в несколько сантиметров [2]. Вторые представляют собой микросхемные (по технологии) ротор и статор с размерами зеркала в единицы миллиметров (на роторе). Они отличаются наилучшим быстродействием среди ГД, но при большом формате МФПУ не перекрывают сечение пучка лучей около фокальной плоскости. Это влечет за собой значительное усложнение оптической схемы либо переход на экзотическую матрицу микрозеркал с синхронно-синфазным управлением [3]. Поэтому рассматривать динамические возможности микроГД (МГД) имеет смысл только в случае, если исчерпаны возможности их макроаналогов.

Вопросу определения характеристик макро-ГД и посвящен дальнейший анализ.

**Основные положения приближенной теории динамики макро варианта Д-ТП.** 1. Рассмотрим для простоты одноосный дефлектор, так как последующий переход к двухосному (строчно-кадровому) связан в основном с чисто схемно-конструктивными усложнениями.

2. В качестве оценки сверху по предельно достижимым динамическим характеристикам ограничимся теорией второго порядка на базе кусочно-постоянных ускорений:

$$\ddot{\Omega}(t) = \ddot{\Omega}_m = \text{const.}$$

Последнее условие выполняется по участкам, как на рис. 2.

Реальный закон движения является более сложным, так как на нем сказывается еще целый ряд второстепенных, но, возможно, все же существенных факторов: противо-ЭДС, трение в гибком подвесе, сопротивление воздуха, гистерезис и др. Все эти факторы являются, безусловно, мешающими. Поэтому приближенная теория только завышает результат, который не может быть превзойден реальным Д-ТП (дает оценку сверху). В то же время пробное моделирование с помощью ПО системы Simulink показало, что учет дополнительных факторов не меняет основных общих выводов.

**Расчетные соотношения.** Из оптической схемы (см. рис. 1) следует, что углы, скорости и ускорения отклонения Д-ТП связаны с его местоположением на оптической оси и сечением пучка лучей, определяющего максимальный размер зеркала  $l_3$ , соотношением

$$\ddot{\Omega} = \ddot{\Omega}_{\text{л.в}} \frac{D_{\text{в.з}}}{l_3}, \quad (1)$$

где  $D_{в.з}$  — диаметр входного зрачка, определяющий размер главного зеркала.

Отметим при этом, что размер зеркала дефлектора на самом деле еще значительно меньше, так как оно отклоняется только в пределах поля зрения, много меньшего поля обзора, в пределах которого должно отклоняться главное зеркало. При больших полях обзора дополнительный выигрыш может составить 2 раза и более.

Из (1) следует, что чем дальше от входа оптической системы находится Д-ТП, тем меньше его массогабаритные характеристики (МГХ), но сложнее динамика. Поэтому дробь в (1) при телецентрической оптике играет роль передаточного отношения по параметрам движения Д-ТП.

Таким образом, для достижения требуемого  $\ddot{\Omega}_{м.л.в}$  необходимо существенно большее  $\ddot{\Omega}_m$  Д-ТП. Однако по указанным причинам оно вполне доступно малоинерционному дефлектору. Если по опыту разработок ГД принять, что

$$M_{вр} = K_M l_3^2;$$

$$I_{\Sigma н} = I_3 + I_{п.н} \equiv K_M l_3^3,$$

где фигурируют моменты инерции самого зеркала и его инерционной нагрузки, то можно считать, что необходимое решение можно искать на пути дефлексии луча.

Использование режима стоп-кадр работы “смотрящей” ИК-матрицы (см. МФПУ), т.е. неподвижности линии визирования ТП в период накопления  $\tau_n$  (экспозиция), может быть обеспечено без нарушения работы привода главного зеркала в обзорном режиме ТП путем компенсации скорости сканирования  $\omega_{ск}$  обратным движением Д-ТП.

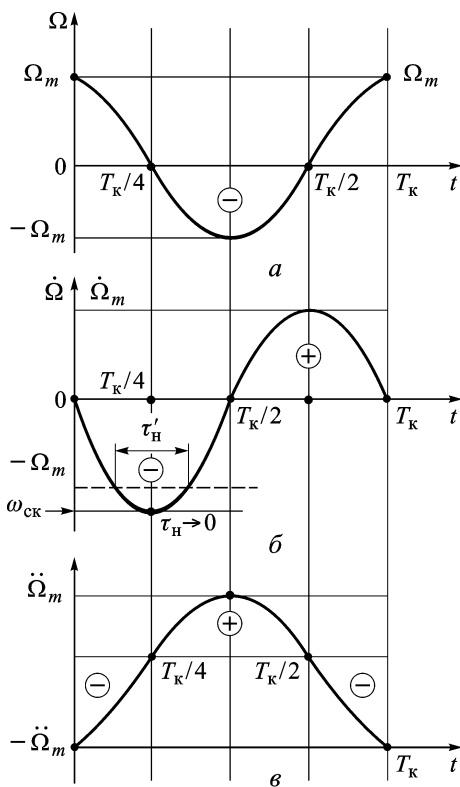
Являясь второй, точной ступенью привода управления линией визирования, дефлектор в режиме колебаний антискана может на каких-то интервалах развивать угловую скорость  $\Omega = -\omega_{ск}$  и тем самым приостанавливать обзор на время  $\tau_n$ .

Самым простым описанием подобного режима при малых значениях  $\tau_n$  является его приближенное представление в виде гармонических колебаний (рис. 3):

$$\Omega(t) = \Omega_m \cos \frac{2\pi}{T_k} t;$$

$$\dot{\Omega}(t) = -\Omega_m \frac{2\pi}{T_k} \sin \frac{2\pi}{T_k} t;$$

$$\ddot{\Omega}(t) = -\Omega_m \frac{4\pi^2}{T_k^2} \cos \frac{2\pi}{T_k} t,$$



**Рис. 3. Временные диаграммы движения Д-ТП в режиме гармонических колебаний**

при этом

$$\dot{\Omega}\left(t = \frac{T_K}{4}\right) = -\omega_{ск},$$

$T_K$  — время цикла колебаний Д-ТП.

Из приведенных выражений следует, что

$$\Omega_m = \frac{\omega_{ск} T_K}{2\pi};$$

$$\ddot{\Omega}_m = 2\pi \frac{\omega_{ск}}{T_K};$$

$$\dot{\Omega}_m = -\omega_{ск}.$$

Если же учесть возможную погрешность антискана

$$\delta\omega_{ск} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{ск}}$$

(штриховая линия, рис. 2), то время накопления  $\tau_H$  примет условное (по нахождению в допуске по скорости) конечное значение

$$\tau'_H = \frac{T_K}{4} \left[ 1 - \arcsin \frac{2\pi}{T_K} (1 - \delta\omega_{ск}) \right].$$

Так, при типичном допуске  $\delta\omega = 0,05$  будем иметь  $\tau'_H = 0,064 T_K$ , что явно неудовлетворительно из-за кратковременности интервала компенсации.

Гармонические колебания являются выгодными для динамики дефлектора как такового. Они позволяют использовать явление резонанса для экономии энергетики его электромагнитного привода.

В то же время они крайне невыгодны с точки зрения относительной длительности экспозиции, так как приводят только к кратковременной компенсации.

Если же отступить от гармонического характера колебаний, но оставить их симметричными относительно середины периода, то мы отступим и от условий резонанса, введя высшие гармонические составляющие.

Более реальным приближением к требуемому может служить асимметричный, приближающийся к прогрессивной развертке, закон движения Д-ТП с локально-постоянными на участках разгона, торможения и, возможно, длительного “стояния” ускорениями по участкам:  $\ddot{\Omega}_i = \text{const}$ . Он иллюстрируется рис. 2, на котором отображена его существенная асимметрия относительно середины цикла  $T_K/2$  и разбивка на участки с длительностью:

—  $t_{pH}$  — разгон для перехода к накоплению

$$\ddot{\Omega}(t) = -\ddot{\Omega}_m = \text{const};$$

—  $\tau_H$  — накопление

$$\dot{\Omega}(t) = 0;$$

—  $t_{т.н}$  — торможение после накопления;

—  $t_{p.в}$  — разгон для возврата в исходное положение;

—  $t_{т.в}$  — торможение при возврате

$$\ddot{\Omega}(t) = -\ddot{\Omega}_m = \text{const}.$$

Такой закон движения можно привязать к основным динамическим параметрам Д-ТП.

Из интегральных соотношений данного закона изменения ускорений (имеющего, к сожалению, разрывы в производной) вытекают следующие соотношения по интервалам “догона” ( $t_{pH} + \tau_H + t_{т.н}$ ) и “возврата” ( $t_{p.в} + t_{т.в}$ ):

— уравнение рабочего хода

$$\ddot{\Omega}_m \frac{t_{pH}^2}{2} + \omega_{ск} \tau_H + \ddot{\Omega}_m \frac{t_{т.н}^2}{2} = 2\Omega_m;$$

— уравнение холостого хода

$$\ddot{\Omega}_m \frac{t_{p.в}^2}{2} + \ddot{\Omega}_m \frac{t_{т.в}^2}{2} = 2\Omega_m.$$

Учитывая “равноправность” при данном законе движения разгонов и торможений  $|\ddot{\Omega}|$ , можно записать

$$t_{p.H} + t_{т.H} = t_H = \frac{\omega_{CK}}{|\ddot{\Omega}_m|} \quad \text{и} \quad t_{p.B} + t_{т.B} = t_B,$$

а также зафиксировать временную “раскладку” по участкам

$$2t_H + \tau_H + 2t_B = T.$$

После тождественных преобразований последних четырех уравнений с четырьмя неизвестными можно получить

$$\begin{aligned} t_H^2 + t_H \tau_H &= t_B^2; \\ t_B &= \frac{T_K - \tau_H}{2} - t_H; \\ \tau_H^2 - 2T_K \tau_H + T_K (T_K - 4t_H) &= 0; \\ a\tau_H^2 + b\tau_H + c &= 0; \end{aligned} \quad (2)$$

$$a = 1; \quad b = -2T_K; \quad c = T_K (T_K - 4t_H).$$

Нетрудно убедиться, что дискриминант квадратного уравнения (2)  $b^2 - 4ac < 0$  существенно положителен, поэтому он имеет два действительных корня:

$$\tau_H = T_K \pm 2\sqrt{T_K \frac{\omega_{CK}}{\ddot{\Omega}_m}}, \quad (3)$$

из которых физический смысл имеет только корень с вычитанием второго слагаемого (3), так как в противном случае часть оказалась бы больше целого.

При этом мы получаем максимальный выигрыш в коэффициенте использования времени кадра на экспозицию (накопление) — КПД дефлектора

$$\eta_d = \tau_H / T_K = 1 \pm 2\sqrt{\frac{1}{T_K} \frac{\omega_{CK}}{\ddot{\Omega}_m}}.$$

Из формулы (3) вытекает неперемное условие — время разгона не может быть меньше четверти цикла и асимптотическое соотношение  $\eta_d = 1$  при бесконечно большом значении ускорения.

Величина  $\omega_{CK}$  не является самостоятельным параметром, поэтому ее удобно выразить через параметры строчного сканирования поля зрения:

$$\omega_{CK} = \frac{\alpha_{п.з}}{T_K}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{п.з}$  — поле зрения ТП.



Выражения (3) и (4) дают зависимость

$$\eta_d = f \left( \left| \ddot{\Omega}_m \right|, T_k \right)$$

от важнейшего параметра ТП —  $T_k$  и от главного динамического параметра Д-ТП в режиме антисканирования — значения ускорения вращения максимально возможного при управляющем воздействии  $M_{вр}$  и вращательной инерционной нагрузке  $I_{\Sigma н}$ .

Отметим, что сама по себе экспозиция определяется синхронизацией открывания и закрывания фотозатвора ФПУ с движением зеркала дефлектора на участке компенсации.

Поэтому фотозатвор должен иметь управление по сигналам дефлектора, иначе запас по экспозиции будет вызывать смаз изображения на краях поля зрения, а запас по компенсации — снижение значения  $\eta$ .

Отметим, что дефлектор должен иметь высокую точность съема угла его отклонения, чтобы не ухудшать существенно суммарную (по обоим контурам) точность позиционирования линии визирования.

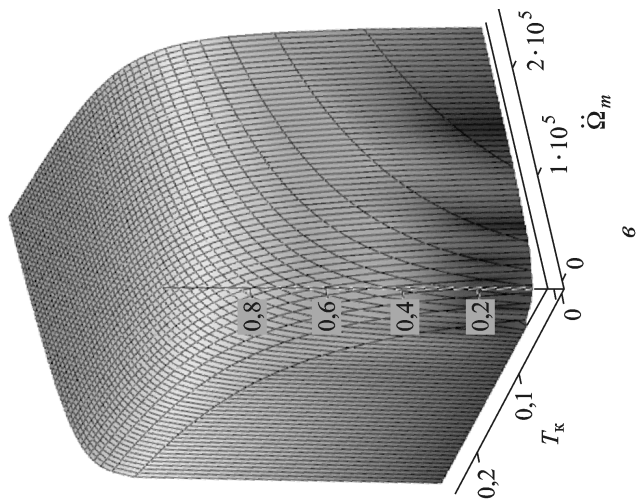
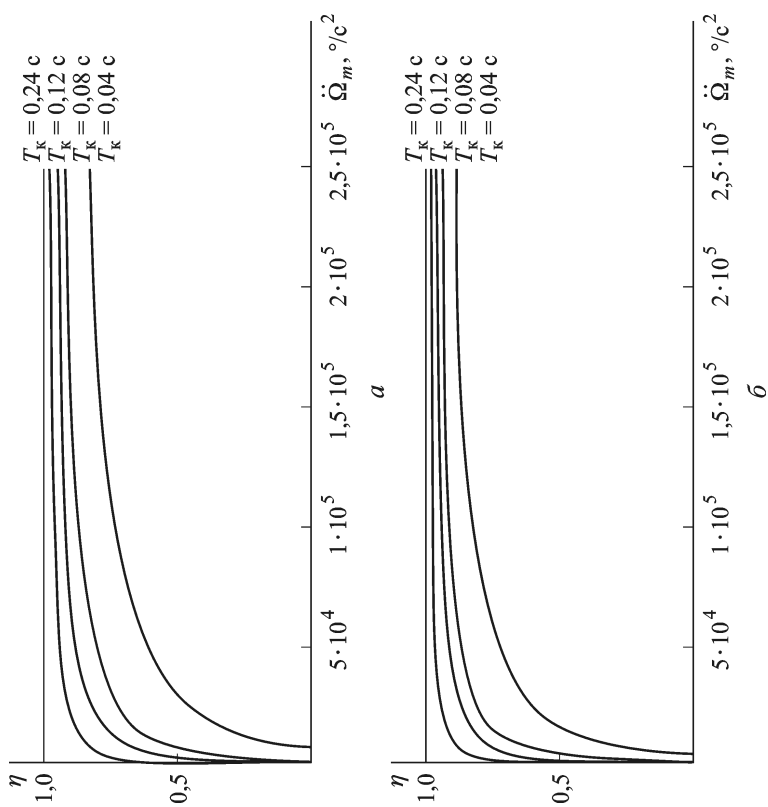
Повышение динамичности дефлектора — увеличение  $\left| \ddot{\Omega}_m \right|$  вызывает рост  $\eta_d$ , играющего роль КПД второго контура привода. Это показано на рис. 2 изменением закона движения Д-ТП с более протяженным участком синхронизации с движением линии визирования от первого контура привода. Измененный ход во времени величин  $\ddot{\Omega}$ ,  $\dot{\Omega}$  и  $\Omega$  при неизменных  $\omega_{ск}$  и  $T_k$  показан на рис. 2 штриховыми линиями.

**Результаты расчета КПД дефлектора.** На рис. 4 представлены результаты расчета  $\eta$  в зависимости от  $\dot{\Omega}_m$  для различных значений времени кадра.

Расчеты проведены для взятых в качестве примеров значений поля зрения ТП —  $\alpha_{п.з} = 3^\circ$  (рис. 4, б) и  $\alpha_{п.з} = 1,5^\circ$  (рис. 4, в).

На рис. 4, в результаты для первого случая представлены в трехмерном виде (вправо — ось ускорений, а влево — времени кадра).

Для правильной интерпретации практической значимости полученных результатов целесообразно “войти” в полученные графики с реальными значениями ускорений, развиваемых коммерчески доступными типами дефлекторов. Для примера можно взять образцы лидирующей в этой области фирмы Cambridge Technolodgy марки XLR8 2D Scan Reed и Pro Seniest Scan Heads. В проспекте фирмы [2] приводятся данные по динамическим параметрам определенных типоразмеров этих образцов. Первый из них проходит элемент разрешения 16 мкрад за время 275 мкс, а второй при размере зеркала 10 мм — 12 мкрад за 100 мкс. В переводе на ускорение это соответствует  $5 \cdot 10^4$  и  $2,5 \cdot 10^5$  °/с. По приведенным графикам это выводит на значения КПД дефлектора около 60 % в первом случае и 80 % — во втором. Таким образом, полезный эффект по накоплению сигнала от динамичности



**Рис. 4. График зависимости КПД Д-ТП от требуемого значения максимального ускорения при угловых полях  $\alpha_{ПЗ} = 3^\circ$  (а),  $\alpha_{ПЗ} = 1.5^\circ$  (б) и в трехмерном виде (в)**

дефлектора находит свое практическое подтверждение. Побочный эффект заключается в значительном облегчении (экономии МГХ) основного контура, привод которого резко упрощается при непрерывном режиме сканирования (вместо стартстопного), даже с учетом затрат на второй контур.

**Выводы.** 1. В предположении локально-постоянных значений ускорения движения Д-ТП на участках его разгона и торможения с нулевым значением  $\ddot{\Omega}$  на интервале накопления сигнала в МФПУ, можно использовать очень простые, полученные как оценка сверху, зависимости между основными параметрами Д-ТП:  $\eta_d$ ,  $\tau_n$ ,  $T_c$ ,  $\Omega_m$ ,  $\omega_{ск}$ ,  $\ddot{\Omega}_m = \frac{M_{дв}}{I_n}$  его асимметричных колебаний. Они определяют динамические ограничения по времени накопления и динамическую эффективность дефлектора.

2. Для ослабления этих ограничений, что имеет смысл в условиях, когда время экспозиции МФПУ не лимитируется его насыщением засветкой от фона, следует оптимизировать  $\omega_{ск}$ , улучшать динамику Д-ТП, максимизируя предельное значение ускорения  $\ddot{\Omega}_m$ , т.е. повышая действующий момент  $M_{дв}$  и снижая его инерционную нагрузку  $J_n$ .

3. Из полученных результатов следует, что при использовании антискана КПД дефлектора  $\eta_d$  может быть повышен до значительно больших значений, чем при его отсутствии. По имеющемуся опыту разработок КПД может быть повышен до значения  $\eta_d = 0,5$  при  $T_k = 0,04$  с вместо  $\eta_d = 0,25$ , характерного для одноконтурного привода. А это соответствует улучшению пороговой чувствительности в 1,4 раза, что немаловажно. При больших значениях  $T_k$  могут быть легче достигнуты значения, приближающиеся к единице.

4. Сопоставление с динамическими параметрами коммерчески доступных импортных образцов фирмы “Кембридж технолоджи” говорит о возможности доведения этого коэффициента до 0,6...0,8.

5. Кроме того, Д-ТП дает возможность уменьшать время кадра до недоступных одноконтурному приводу значений, позволяющих проводить быстрый обзор малым полем. Это важно для организации межкадровой обработки с приемлемым по динамике излучения периодом обзора. Также полезен ожидаемый выигрыш в массогабаритных характеристиках и энергопотреблении основного привода, который должен перекрыть затраты МГХ и электропитания на введение второго контура.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заявка 2008135853/09 РФ, МПК G01S3/789. Теплопеленгатор / Востриков Г.Н. и др.; заявитель ФГУП “ПО “Уральский механический завод им. Э.С. Яламова”; опубл. 10.08.2010.

2. Н е с т е р у к И. Н. Современные гальванометрические сканаторы // Фотоника. – 2007. – № 3. – С. 10–11.
3. Cambridge Technology, 2012. www.camtech.com
4. Ч е с н о к о в Д. В. Микромеханический дефлектор световых потоков // ОЖ. – 2002. – Т. 69. – № 11. – С. 65–71.

Статья поступила в редакцию 10.09.2012

Вячеслав Владимирович Крыжановский — заместитель главного конструктора ОАО “НПП “Геофизика-Космос”, ассистент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двенадцати научных работ в области оптоэлектроники.

V.V. Kryzhanovskiy — deputy chief designer of ОАО NPP Geofizika-Kosmos, assistant lecturer of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 12 publications in the field of optoelectronics.

Виктор Львович Левшин — д-р техн. наук, главный специалист ОАО “НПП “Геофизика-Космос”, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области оптоэлектроники.

V.L. Levshin — D. Sc. (Eng.), chief specialist of ОАО NPP Geofizika-Kosmos, professor of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of optoelectronics.

Борис Олегович Берников — инженер ОАО “НПП “Геофизика-Космос”, аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух научных работ в области оптоэлектроники.

B.O. Bernikov — engineer of ОАО NPP Geofizika-Kosmos, post-graduate of “Laser and Optic-Electronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of two publications in the field of optoelectronics.