

УДК 528.8 (15)

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ПОВЫШЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

А.В. Демин, А.В. Денисов, И.А. Перл, А.А. Третьякова

Описан оптико-электронный комплекс дистанционного зондирования Земли с повышенной производительностью и эффективностью процесса дистанционного зондирования Земли.

**Ключевые слова:** оптико-электронный комплекс, дистанционное зондирование Земли, ФПЗС-линейка.

**Введение**

Исследования в интересах народного хозяйства и обороноспособности государства обеспечиваются оптико-электронными комплексами дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса (ОЭК<sub>ДЗЗ</sub>), наряду с известными методами и средствами повышения эффективности управления научно-техническими и технологическими процессами, связанными с разнообразными направлениями. Находящиеся сегодня в эксплуатации коммерческие спутники первого поколения (Ikonos, Quick Bird и др.), оснащенные ОЭК<sub>ДЗЗ</sub>, обеспечивают съемку поверхности Земли с пространственным разрешением не более 1 м и с точностью геопривязки изображений около 15–25 м без наземных контрольных точек [1]. На 53-м Международном конгрессе по аэронавтике (Хьюстон, США, 2002 г.) Европейская промышленная корпорация представила космический аппарат (КА) с ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> массой 980 кг (рис. 1), который обеспечивает на солнечно-синхронной орбите с высоты 695 км пространственное разрешение в надире 0,7 м с полосой захвата в 20 км в панхроматическом режиме съемки поверхности Земли и 2,8 м – в мультиспектральном (голубой, зеленый, красный и около ИК), производительность 30000 км<sup>2</sup> за виток (летний сезон и снимки без облаков) и 3,5 Гб/с.

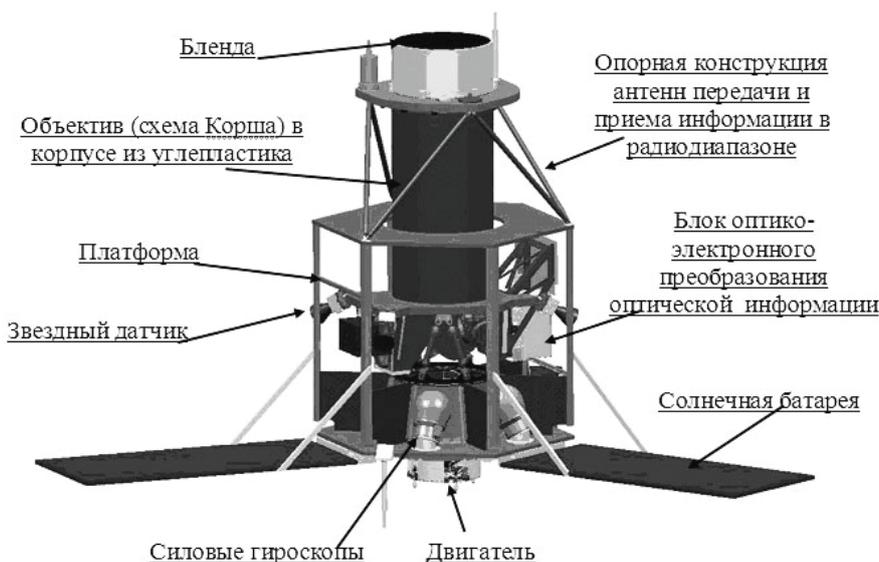


Рис. 1. Космический аппарат с ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> (Европейская промышленная корпорация)

На рис. 2 представлена обобщенная структурная схема оптико-электронного преобразователя (ОЭП). Объектив ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> формирует изображение поверхности Земли на фотозоне, в поле которой расположены приемники. ОЭП состоит из множества чувствительных элементов – пикселей фотоприемника на основе прибора с зарядовой связью (ФПЗС) и представляет собой в зависимости от конструктивного его исполнения либо аналог растр-линейки, либо аналог растр-матрицы. Тем самым изображение после системы приема сигналов с пикселей фотозоны становится при соответствующей нормировке их цифровым образом, который потом преобразуется в соответствующий информационный пакет. Одной из особенностей работы ФПЗС является обеспечение требуемой экспозиции при съемке, которая определяется, помимо условий съемки, относительным отверстием объектива и временем снятия сигнала с пикселя, т.е. выполнении режима временной задержки и накопления, что приводит к необходимости «удержания» в поле зрения ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> снимаемого участка поверхности Земли (тангажирования). В значительно меньшей степени выполнение алгоритма тангажирования требуется для ФПЗС-матрицы, чем для ФПЗС-линейки.



Рис. 2. Обобщенная структурная схема оптико-электронного преобразователя ОЭК<sub>ДЗЗ</sub>

### Работа ОЭК<sub>ДЗЗ</sub>

Для работы ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> в панхроматическом и мультиспектральном режиме съемки при реализации фотозоны на основе растр-линейки достаточно одной ФПЗС-линейки, в случае же реализации фотозоны на основе растр-матрицы потребуются пара ФПЗС-матриц. В работе рассмотрена возможность применения параллельно-последовательного алгоритма съема информации с ОЭП на основе ФПЗС-линейки для спутников с ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> массой порядка 100 кг, обеспечивающих дистанционное зондирование поверхности Земли в панхроматическом и мультиспектральном режиме без пропусков участков.

Не умаляя общности соотношений, приведенных в работе [2], преобразуем их для случая движения ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> с ОЭП на основе ФПЗС-линейки при наблюдении в надир относительно подспутниковой точки на поверхности Земли в плоскости орбиты без рыскания и крена, что представлено на рис. 3 и соотношениями (1).

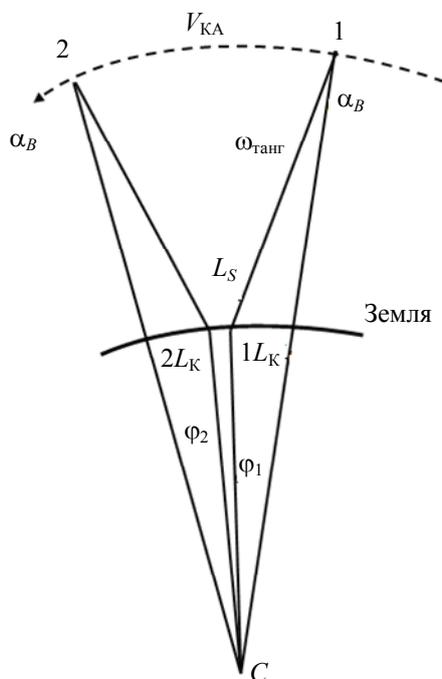


Рис. 3. Плоскость орбиты

$$\left. \begin{aligned}
 W_{\text{СДИ-ОЭП}} &= \frac{\delta}{\tau_{\text{пр}}} = W_{\text{ПСТ-ОЭП}} - W_{\text{КА-танг-ОЭП}}; \\
 W_{\text{ПСТ-ОЭП}} &= V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \varphi) \times \frac{f'}{D_H}; \\
 W_{\text{КА-танг-ОЭП}} &= W_{\text{ПСТ-ОЭП}} - \frac{\delta}{\tau_{\text{пр}}}; \\
 \omega_{\text{танг}}(\alpha_B) &= \frac{V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \varphi)}{D_H} - \frac{\delta}{\tau_{\text{пр}} \times f'}; \\
 \varphi &= \arcsin\left(\frac{D_H}{R_{\text{Земли}}} \times \sin \alpha_B\right); l_{\text{ПП}} = \frac{\delta \times D_H}{f' \times \cos(\alpha_B + \varphi)} \\
 D_H &= (R_{\text{Земли}} + H) \cos \alpha_B - \sqrt{R_{\text{Земли}}^2 - (R_{\text{Земли}} + H)^2 \times \sin^2 \alpha_B} \\
 t_{\text{скан}} &= \frac{2\alpha_B}{\omega_{\text{танг}}(\alpha_B)}; L_S = V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \varphi) \times t_{\text{скан}} - 2R_{\text{Земли}} \times \varphi; \\
 Z_W &= \frac{W_{\text{ПСТ-ОЭП}}(\alpha_B)}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}}; Z_\omega = \frac{\omega_T(\alpha_B = 0)}{\omega_T(\alpha_B \neq 0)}.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

В соотношениях (1) приняты следующие обозначения:  $V_{\text{КА}}$  – линейная скорость движения КА;  $V_{\text{СДИ}}$  – скорость сдвига изображения в фотозоне ОЭП;  $V_{\text{ПСТ}}$  – линейная скорость подспутниковой точки;  $f'$  – фокусное расстояние объектива ОЭК<sub>ДЗЗ</sub>;  $H$  – высота орбиты КА относительно подспутниковой точки;  $W_{\text{СДИ-ОЭП}}$  – необходимая скорость движения изображения для обеспечения требуемой экспозиции при съемке;  $\delta$  – размер пикселя фотозоны ОЭП;  $W_{\text{КА-танг-ОЭП}}$  – скорость сдвига изображения в фотозоне ОЭП при тангажировании;  $\tau_{\text{пр}}$  – необходимое время накопления сигнала на пикселе при съемке (свойство фотозоны);  $N$  – число шагов накопления (число повторения засветки пикселя для получения сигнала требуемого уровня);  $\omega_{\text{танг}}$  – угловая скорость тангажирования;  $1L_K$  и  $2L_K$  – величина 1-го и 2-го равных кадров;  $l_{\text{ПП}}$  – проекция пикселя на поверхность Земли;  $L_S$  – величина слепого (т.е. невидимого) участка поверхности Земли;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между радиусами Земли ( $R_{\text{Земли}} = 6371$  км), проведенными через подспутниковую точку и точку визирования;  $\alpha_B$  – угол визирования ОЭК<sub>ДЗЗ</sub>.

### Анализ результатов расчета параметров для ОЭК<sub>ДЗЗ</sub>

В таблице приведены результаты расчета параметров для ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> в соответствии с (1).

Рассчитываемые параметры	Исходные данные ОЭК <sub>ДЗЗ</sub> при наблюдении в надир: $H=575$ км; $f'=1670$ мм; $V_{\text{ПСТ}}=6,948$ км/с; $t_{\text{пр}}=1,5 \times 10^{-3}$ с; $\delta=5$ мкм; $V_{\text{СДИнадир}}=20,18$ мм/с; $W_{\text{СДИ-ОЭП}}=3,333$ мм/с			
	$\alpha_B=0^\circ$	$\alpha_B=10^\circ$	$\alpha_B=20^\circ$	$\alpha_B=30^\circ$
$D_H(\alpha_B)$ , км	575	584	615,6	674
$\varphi(\alpha_B)$ , град	0	0,91	1,894	3,03
$W_{\text{ПСТ-ОЭП}}$ , мм/с	20,18	19,51	17,489	14,433
$Z_W$	6,055	5,85	5,25	4,33
$W_{\text{КА-танг-ОЭП}}$ , мм/с	16,847	16,177	14,156	11,1
$\omega_{\text{танг}}(\alpha_B)$ , с <sup>-1</sup>	0,01009	0,00969	0,00848	0,00665
$Z_\omega$	1	1,041	1,19	1,52
$t_{\text{скан}}(\alpha_B)$ , с	0	34,88	69,77	104,65
$l_{\text{ПП}}(\alpha_B)$ , м	1,7	1,78	1,99	2,41
$L_S(\alpha_B)$ , км	0	40,1	63,83	53,71

Таблица. Расчет параметров для ОЭК<sub>ДЗЗ</sub>

Из анализа таблицы видно, что, если линейное разрешение на местности должно быть не более 2 м, то  $\alpha_B$  должно быть не более  $20^\circ$ , а для того, чтобы выдержать необходимое условие экспонирования, необходимо обеспечить замедление скорости движения изображения в 6–5,25 раз. Это возможно только при выполнении тангажирования, т.е. удержание в поле зрения ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> с ОЭП на основе ФПЗС-линейки снимаемого участка Земли на время  $t_{\text{скан}}(\alpha_B)$ . За время возвращения линии визирования в исходное положение для начала съемки следующего по трассе участка ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> пролетает участок длиной  $L_S(\alpha_B)$ , который и является пропущенным в процессе ДЗЗ. Полная информация о снимаемом участке поверхности Земли может быть получена при визировании его в течение времени  $t_{\text{скан}}$ , что равнозначно  $Z_W$ . Для сокращения  $t_{\text{скан}}$ , а соответственно и  $L_S(\alpha_B)$  разобьем ФПЗС-линейку на  $(Z_W + 1)$  участков и применим алгоритм параллельно-последовательного сканирования, т.е. на всех участках одновременно последовательно опрашиваются пиксели, что снижает время  $t_{\text{скан}}$  в  $(Z_W + 1)$  раз.

Реализовать это можно, применив «волновой метод» снятия данных с ФПЗС-линейки [3]. Основная идея этого метода заключается в том, что данные снимаются не со всех пикселей одновременно, а выборочно, группами. Такой подход позволяет кардинально изменить структуру выходных данных, снимаемых с линейки. Пусть набор фотоприемных элементов ФПЗС-линейки разбит на группы длиной  $N$  элементов, тогда выборки, считываемые за один раз, будут содержать каждый  $N$ -ый,  $N+1$ ,  $N+2$  и т.д. элементы. Каждая группа элементов после того, как с нее будет снят заряд, будет снова переходить в режим накопления, но, так как снятие заряда происходит в разное время, то данные, накапливаемые в соседних ячейках, будут разнесены по времени. Рис. 4 показывает соотношение структур результирующих изображений, полученных классическим способом и с применением «волнового» метода. На рис. 5 приведен пример для  $N=3$ . Как видно из схемы, использование «волнового» метода позволяет получить информацию о снимаемых областях, которая раньше находилась между строчек изображения, полученного классическим способом. При этом количество точек результирующего изображения остается прежним, меняется только их расположение. Конфигурация пикселей может играть решающую роль в тех случаях, когда в области съемки оказываются узкие объекты, расположенные параллельно снимающей ФПЗС-линейке, например, реки и автостреды. Если они окажутся пропущенными в процессе съемки, то их восстановление на основе имеющихся пикселей будет невозможно. Использование «волнового» метода дает на выходе не построчное изображение, а равномерное покрытие области съемки пикселями. Меньшее количество информации об отдельных «строчках» изображения классической съемки компенсируется данными о межстрочных участках.

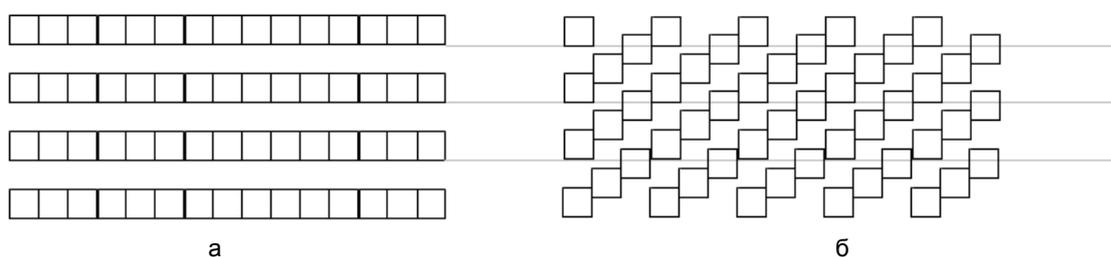


Рис. 4. Структура изображения информации без использования «волнового» алгоритма съема (а) и с применением «волнового» алгоритма съема (б)

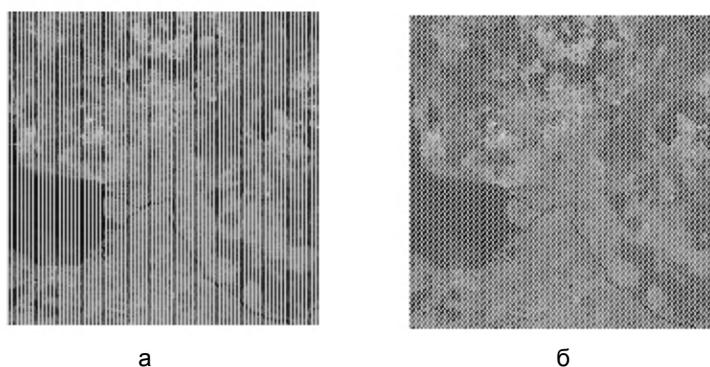


Рис. 5. Результаты моделирования процесса съемки без использования «волнового» метода (а) и с применением «волнового» метода (б)

### Заключение

Таким образом, анализ состояния и тенденций развития ОЭК<sub>ДЗЗ</sub> позволяет сделать вывод, что смещение изображения в фотозоне у модернизированной линейки (без использования тангажного замедления) примерно такое же, как у классической линейки (с учетом тангажного замедления). Использование нового типа сенсора позволяет отказаться от операции тангажирования и дает возможность ведения маршрутной съемки, длительность трассы которой ограничена лишь объемами данных, которые можно передать наземным станциям.

### Литература

1. Демин А.В., Денисов А.В., Летуновский А.В. Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – № 3. – С. 51–59.
2. Петрищев В.Ф. Оптимальная программа сканирования оптико-электронного телескопического комплекса дистанционного зондирования Земли // Труды Proceedings ПА. Международная академия информатизации. – М.: Зеленоград, 2003. – С. 26–38.

3. Демин А.В., Перл И.А. Волновой алгоритм для работы с линейкой ФПЗС // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3. – С. 19–25.

- Демин Анатолий Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, dav\_60@mail.ru
- Денисов Андрей Васильевич* – ОАО «ЛОМО», аспирант, www.denisoff@mail.ru
- Перл Иван Андреевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, j-pearl@mail.ru
- Третьякова Анастасия Александровна* – ОАО «ЛОМО», аспирант, tretyakova\_17@mail.ru