

УДК 629.7.05, 681.777.8(048)

Е. С. Парняков, Мухаммад Рашик Улла Бейг Мирза

Національний авіаційний університет, Київ

**Проблемы использования
волоконно-оптических элементов
в опто-электронных приборах космических информационных систем**

Надійшла до редакції 22.11.05.

Розглядаються основні проблеми використання волоконно-оптичних елементів у опто-електронних зображувальних приладах космічних інформаційних систем. Пропонується здійснювати просторове узгодження роздільної здатності цих приладів з розмірами світлочутливих площадок багатоеlementних перетворювачів за рахунок масштабувальних властивостей волоконно-оптичних елементів.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование, съемка Земли из космоса — это важные средства сбора полезной информации по широкому кругу вопросов деятельности и существования человечества и Земли.

Качество изображения земной поверхности при космической съемке, как известно, зависит от:

- геометрического подобия изображения оригиналу,
- контрастности изображения,
- количества воспроизводимых градаций яркости,
- диапазона изменения яркости изображения,
- отчетливости, отсутствия искажений во всех направлениях,
- резкости изображения границ между деталями изображения с разной яркостью во всех направлениях,
- безошибочности цветопередачи,
- уровня и характера помех,
- размера кадра и его формата,
- стабильности положения изображения, устойчивости синхронизации и др.

В течение последних лет в оптических методах и средствах обработки информации в опто-электронных изображающих приборах космических информационных систем имеет место постоянная тенденция улучшения их следующих характеристик:

- разрешающей способности за счет увеличения соотношения сигнал / шум;
- чувствительности путем введения предварительной усилительной обработки поступающей на фотопреобразователь оптической информации, оптимального согласования максимума спектрального излучения и поглощения излучателя и фотопреобразователя соответственно, исключения постоянной составляющей световых помех и т. д.;
- динамического диапазона от применения различного рода методов и средств адаптации, рационального преобразования светового потока в электрические сигналы, в том числе при использовании его соответствующего масштабирования [1, 3—7, 9—16].

В настоящее время волоконно-оптические элементы играют важную роль в улучшении указанных основных характеристик.

Еще в 1980-х гг. в макете многозональной сканирующей системы (МСС) «Фрагмент», предназначенной для дистанционного измерения энергетической яркости излучения, был использован волоконно-оптический разветвитель в виде жгута с нерегулярной укладкой световодов. По результатам его практического применения были отмечены сравнительно низкие его показатели качества:

- нестабильность коэффициента передачи,
- неоднозначность пространственного согласования входной апертуры разветвителя с выходной апертурой оптической изображающей системы и др. [2, 8].

Современное состояние оптико-электронной техники дает возможность реализации различных структур волоконно-оптических элементов, например фоконов, обладающих масштабирующими и избирательными свойствами. Использование их позволяет улучшить качество изображения и нормировать основные метрологические характеристики указанных систем.

В современных оптико-электронных изображающих приборах, использующих многоэлементный фотопреобразователь на основе набора ПЗС-матриц, разрешающая способность ограничена размером одного пикселя и как правило, превышает величину разрешающей способности объектива.

Считается, что при наблюдении удаленных объектов фотопреобразователь с размером a светочувствительной площадки имеет угловое разрешение порядка $a/2f_{об}$, где $f_{об}$ — заднее фокусное расстояние объектива. Однако экспериментально установлено, что в отдельности светочувствительная площадка (один пиксель) обнаруживает сдвиг и изменение размеров изображения объекта в 10^{-3} диаметра кружка Эйри, равного $\sim \lambda F^2$, где λ — длина волны, $F = f_{об}/dp$, dp — размер входного зрачка объектива. Например, при $f_{об} = 80$ мм, $dp = 26$ мм, $\lambda = 0.9$ мкм величина $10^{-3}\lambda F^2 \sim 0.01$ мкм. Это противоречие может быть исключено при использовании многоэлементных фоконов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Многоэлементные световолоконные фоконы — многоэлементные световолоконные конусы, у

которых входные и выходные торцы разноразмерны, благодаря чему достигается соответствующее пространственное трансформирование светового потока с увеличением или уменьшением его сечения, с соответствующей пространственной ориентацией распределения светового потока.

Общий коэффициент пространственного трансформирования равен

$$K = \frac{S_{\text{вых}} \times \Phi}{S_{\text{вх}} \times \Phi},$$

где $S_{\text{вых}}$ — площадь выходного торца одного фокона, $S_{\text{вх}}$ — площадь входного торца одного фокона, Φ — число фоконов.

В этом заключается существенное отличие применения фоконов от применения обычных световолоконных световодов [8].

Рациональное использование светового потока было достигнуто в макете оптической изображающей системы путем пространственного согласования (оптического масштабирования) разрешающей способности объектива как с размером одной светочувствительной площадки многоэлементного фотопреобразователя при применении многоэлементных фоконов, размещенных перед фотопреобразователем, так и пространственного трансформирования светового потока с соответствующим изменением его сечения. При этом входные торцы фоконов были плотно пристыкованы между собой, расположены вдоль направления измерения в фокальной плоскости объектива (в плоскости локализации изображения) и имели регулярную укладку. По своим размерам каждый из фоконов был также сопряжен с величиной разрешающей способности объектива. Выходные их торцы были размещены перед светочувствительными площадками фотопреобразователя, и по своим размерам сопряжены с размерами его светочувствительных площадок.

Кроме того, с помощью многоэлементных волоконных фоконов был значительно увеличен диапазон измерения. В этом случае фоконы были разделены на N секций из k фоконов. Входные торцы этих секций также были пристыкованы между собой плотно друг к другу в регулярной секционной укладке и расположены вдоль направления измерения в фокальной плоскости объектива. Количество k фоконов в секции было равно количеству светочувствительных площадок многоэлементного фотопреобра-

зователя, а количество секций N было равно количеству фотопреобразователей. Выходной торец каждой в отдельности секции был размещен перед соответствующим фотопреобразователем, по своим размерам сопряжен с ним. Выходной торец каждого фокона секции по своим размерам, в свою очередь, был сопряжен с размерами каждой отдельной соответствующей светочувствительной площадки фотопреобразователя.

Со времени появления волоконной оптики созданы многочисленные устройства (компоненты) для сведения потоков света из нескольких волокон в одно, и наоборот, для разделения потока света из одного волокна в несколько волокон. Эти компоненты известны как оптические ответвители, делители, соединители в линейном и матричном исполнении $n \times m$, $n \times n$ связей. Их используют для пространственного сопряжения протяженных дискретных структур, например фотопреобразователей, микроканальных пластин, модуляторов, мультиплексоров с делителем разных физических параметров, с устройствами затворов, линий задержек и т. д.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Точность анализа и обработки изображения в реальном оптико-электронном изображающем приборе ограничивается не разрешающей способностью объектива, а разрешающей способностью многоэлементного фотопреобразователя. В результате пространственного согласования с помощью многоэлементных световолоконных фоконов разрешающей способности объектива этого прибора с соответствующим размером светочувствительной площадки фотопреобразователя указанная точность была повышена в K раз.

Создание и применение волоконной техники, охватывает ряд технических проблем по метрологическому и технологическому обеспечению различного рода работ, связанных с конструированием, изготовлением, испытанием, сборкой, юстировкой и т. д.

В оптико-электронных изображающих приборах одной из основных метрологических характеристик, определяющих качество этих приборов, служит предельная погрешность линейных измерений положения изображения объекта и его частей, участков в отдельности в плоскости

анализа, например в плоскости расположения светочувствительных площадок многоэлементного фотопреобразователя.

Пространственная протяженность данной плоскости не позволяет контролировать такие технические характеристики:

- масштабные коэффициенты по всему полю;
- кривизну изображения;
- различное рода аберрации оптической системы, например объектива;
- соотношение сигнал / шум по всему полю.

Волоконно-оптические изделия (многоэлементные фоконны, волоконные шайбы, волоконные жгуты, многочисленные ответвители на $1 \times n$, $n \times 1$, $n \times m$, $m \times n$ и т. д.) позволяют пространственно и апертурно разделить поле анализа на отдельные закономерно расположенные и согласованные между собой участки как в пространстве предметов, так и в пространстве изображений.

Это создает возможность реализовать новый подход к измерению и нормированию основных метрологических характеристик указанных приборов путем соответствующих передач, трансформирования и измерения пространственных и энергетических характеристик.

Если принять, что $f(x, y)$ — входная функция, зависящая от параметров измеряемого объекта, $g(x, y)$ — выходная функция, зависящая от параметров его изображения, то двумерное распределение светового потока от каждой точки измеряемого объекта равно

$$f(x, y) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} f(m, n) d(m-x, n-y) dm dn,$$

где $d(m-x, n-y)$ — функция Дирака, определяющая размер изображения точки измеряемого объекта, $f(m, n)$ — весовой коэффициент, пропорциональный пропусканию светового потока для данной точки измеряемого объекта.

Изображение измеряемого объекта может быть рассмотрено как сумма двумерных распределений светового потока соответствующих точек измеряемого объекта, имеющих тот же самый весовой коэффициент, как и у точечного изображения:

$$g(x, y) = K_1 \int \int_{-\infty}^{+\infty} f(m, n) d(m-x, n-y) dm dn,$$

где K_1 — оператор, который представляет функцию преобразования оптической системы.

В случае линейности преобразование может быть представлено в виде

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(m, n) M[d(m-x, n-y)] dmdn,$$

где $M[d(m-x, n-y)]$ — выражение двумерного распределения светового потока от одной точки измеряемого объекта.

Если оптическая система — пространственно-инвариантная система, то указанная функция двумерного распределения для каждой точки — величина постоянная, и выражение $g(x, y)$ принимает вид

$$g(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(m, n) h(m-x, n-y) dmdn,$$

где $h(m-x, n-y) = M[d(m-x, n-y)]$.

Изображение измеряемого объекта — конволюция между входной функцией и указанным двумерным распределением, и для когерентного светового потока $g(x, y) = f(x, y)h(x, y)$.

Для каждого элемента фотопреобразователя, например матричного ПЗС, есть коэффициент трансформации K_2 , поэтому для каждого его элемента

$$G(i, j) = K_2[F(i, j)],$$

где $G(i, j)$, $F(i, j)$ — выходной и входной сигналы соответственно, i, j — номера соответствующих элементов, а для всего матричного состава

$$g(mn) = K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(i, j), K(i, j),$$

где $K(i, j)$ — суммарный коэффициент преобразования для каждого элемента.

С помощью волоконно-оптических изделий можно разделить измеряемый образцовый объект на отдельные площадки, трансформировать световые потоки от них с соответствующими коэффициентами трансформации. Тогда в плоскости анализа, измерив выходные сигналы, можно судить о трансформирующих свойствах оптической системы совместно с многоэлементным преобразователем.

При значительном удалении объекта от изображающего оптико-электронного прибора соответствующие коэффициенты преобразования уменьшаются в квадратурной зависимости от этого удаления. Функционирование прибора ограничивается расстоянием, при котором величина светового потока достигает порогового значения воспринимаемого светового потока. Расши-

рение функциональных возможностей, чувствительности рассматриваемого прибора получают использованием многоэлементных фоконов с микроканальными пластинами.

Для реализации волоконно-оптических элементов в оптико-электронных изображающих приборах все еще остаются следующие находящиеся в стадии лабораторных исследований проблемы:

- распределение индикатрисы излучения из одного волокна, из рядом расположенных волокон с учетом их несоосности, нерегулярности укладки в многоэлементном световолоконном фоконе, микроканальной пластине и др.,
 - влияние трещинного слоя от шлифовки, полировки торцов фоконов на основные параметры этих фоконов,
 - оценка эффективности стыковки волокна, многоэлементных световолоконных фоконов с многоэлементными фотопреобразователями, микроканальными пластинами, с элементами волоконно-оптической техники (с учетом каналов, несоосностей и др.),
 - оценка эффективности методов и средств нанесения просветления на торцы указанных элементов,
 - пространственное, спектральное и др. согласование указанных многоэлементных устройств,
 - искажения, создаваемые указанными устройствами при передаче пространственно-частотно-временной топологии предмета,
 - оценка оптимальности соотношения между диаметрами жилы и оболочки на основе требуемых основных параметров, распределения светового потока, взаимодействия световых потоков смежных волокон и т. д.
- Преимущества анализаторов, содержащих совместно фотопреобразователи с приборами зарядовой связи (ФПЗС) и фоконы, следующие:
- малые габариты,
 - высокая чувствительность (порядка 10^{-14} Дж),
 - высокая разрешающая способность (более 30 лин./мм),
 - большой динамический диапазон (изменение освещенности на три порядка не нарушает существенно качество изображения),
 - малая потребляемая мощность (для питания

- тактовых генераторов),
- высокая точность измерения положений изображений предмета,
- жесткая привязка опорной сетки считывания информации к топологии накопительного регистра ФПЗС, носящего строго регулярный характер расположения ее элементов,
- простота согласования ФПЗС с микропроцессором, применяемым для управления режимами работы и считывания зарядов с соответствующих ячеек ФПЗС,
- возможность считывания нескольких изображений марки без потери чувствительности и точности в целом,
- возможность регулировки чувствительности за счет изменения экспозиции,
- нечувствительность к влиянию магнитных полей.

К недостаткам этих анализаторов относится следующее:

- дискретный характер изменения интегральной чувствительности и распределения темнового тока от ячейки к ячейке по всей площади,
- зависимость уровней сигнала от длины волны излучения,
- возможность растекания зарядов, ведущая к смазыванию изображения во время считывания,
- необходимость охлаждения до $T = -40$ °С для предотвращения накопления темнового заряда за счет термогенерации темнового тока,
- необходимость обеспечения высокой стабильности положения автоколлиматора и контрольного элемента для полной реализации эффекта накопления зарядов в ячейках ФПЗС во время экспозиции изображения предмета.

Отдельное волокно многоэлементных волоконных изделий представляет отдельный канал многоэлементной (многоканальной) системы передачи информации. Суждения по аналогии подсказывают, что внутренние шумы такого отдельного волокна должны быть значительно меньше внутренних шумов отдельного световолокна по площади светового сечения, равного площади светового сечения всей многоэлементной конструкции световолоконной системы, как это следует, например, для одной светочувствительной площадки фотоприемного устройства в

многоэлементном исполнении по сравнению с одноэлементным. В этом одно из самых важных преимуществ многоэлементных волоконно-оптических изделий по сравнению с традиционными зеркально-линзовыми системами.

Одной из частных задач в измерительной технике является перенос из одной плоскости изображения в другую сопряженную плоскость с некоторым масштабным коэффициентом трансформирования изображения. В решении этой задачи используют многоэлементные световолоконные фоконы. На рисунке показаны главные плоскости объектива, показатели преломления n_1 и n_2 жилы и оболочки соответственно, задняя апертура указанной системы, входная апертура фоконна, фотоприемники.

Числовая апертура одного световолокна фоконна определяется как

$$NA = \frac{IK(n_1^2 - n_2^2)}{2} = K \sin \sigma_{\text{вх}},$$

где n_1 , n_2 — показатели преломления сердцевины и оболочки, K — коэффициент оптической редукиции фоконна.

Если $R_m = \frac{1}{2 \cdot 0.02} = \frac{50}{2} = 25$ лин./мм — разре-

шающая способность ФПЗС, $V = \frac{D}{d} > 1$ —

увеличение фоконна (коэффициент оптической редукиции, коэффициент передачи), где D , d — наибольший и наименьший диаметры торцов фоконна соответственно, L — размер светочувствительной площадки ФПЗС, то имеет место проигрыш в освещенности при использовании системы «фокон + ФПЗС»:

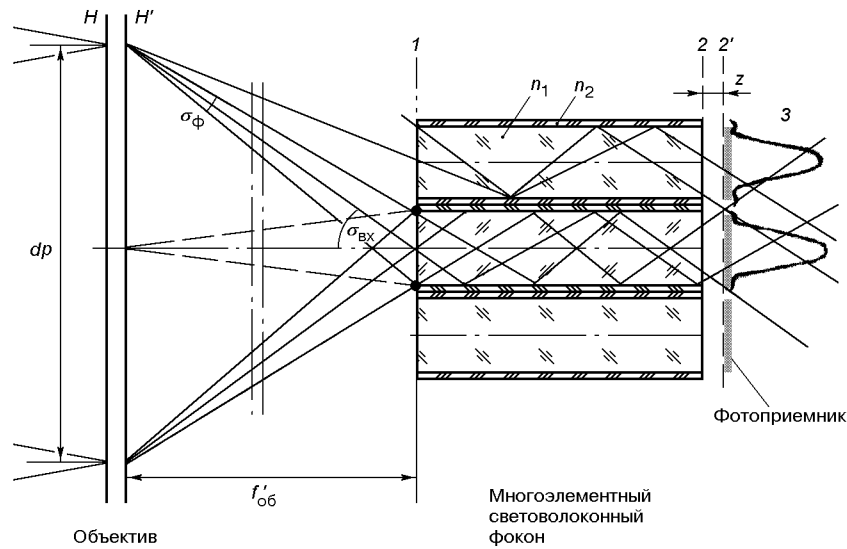
$$P_i = P_0 \tau \left(\frac{d}{D} \right)^2 = P_0 \tau \left(\frac{1}{V} \right)^2,$$

где P_i — выходная мощность излучения i -го фоконна, P_0 — входная мощность излучения фоконна, τ — коэффициент пропускания фоконна.

Общую разрешающую способность системы «фокон + ФПЗС» определяют из условия

$$R^{-1} = \sqrt{R_m^{-2} + R_\phi^{-2}},$$

где $R_m = 1/(2L)$, $R_\phi = 1/(2d)$, $\psi = R/R_m = = L(L^2 + d^2)^{-1/2}$. Выигрыш в разрешающей способности в ψ раз сопровождается уменьшением освещенности на ФПЗС в v^2/r раз.



Ход лучей в системе «фокус + ФПЗС»: 1 — плоскость изображения, 2 — плоскость трансформированного изображения, 2' — плоскость допустимой установки фотоприемника, 3 — распределение светового потока в фокусе

Потери мощности излучения в волокне вызывают абсорбция, рассеивание и отражение (зависит от типа волокна).

На выходе фоконна мощность излучения равна

$$P = P_0 e^{-\omega(\alpha l)},$$

где P_0 — мощность падающего на входной торец излучения, P — выходная мощность, l — длина волокна, ω — коэффициент затухания, зависящий от угла падения и длины волны излучения.

Плоскость допустимой установки светочувствительных площадок фотоприемного устройства — это плоскость, в которой нет перекрестных связей между световыми потоками двух смежных фоконов.

Точность измерений определяется предельным углом разрешения, величина которого зависит от дифракции света в объективе.

Во избежание влияния дифракции и перекрестных связей между световыми потоками смежных волокон необходимо плоскость светочувствительных площадок фотоприемного устройства располагать как можно ближе к плоскости размещения выходных торцов фоконов. Например, при $f'_{об} = 100$ мм, $dp = 30$ мм, $L = 20$ мкм имеем $z \sim 12$ мкм. На практике изображение объекта представляет протяженную в пространстве (а не точную) картину — изображение предмета, ко-

торый необходимо рассматривать как сумму непрерывных светящихся точек, простирающихся по ширине и длине. По этой причине требуется угловое и осевое центрирование для того, чтобы условия прохождения крайних лучей через многоэлементный световолоконный фокус были бы одинаковыми. Негомоцентричность пучка лучей приводит не только к искажениям изображения объекта в пространстве, но и к перераспределению освещенности изображения по всему полю.

Следует отметить, что по этой же причине всегда имеет место сферическая aberrация объектива, которая может быть исправлена при соответствующем формировании и согласовании входного и выходного торцов многоэлементного фоконна. Например, его входная поверхность должна быть сферической (с кривизной, равной сферической aberrации), а выходная поверхность — плоской, прилегающей к светочувствительным площадкам фотоприемного устройства.

При перемещении изображения в I плоскости изображения предмета вдоль плоскости анализа положения этого изображения имеет место нарушение симметрии в дифракционной картине, что приводит к перераспределению светового потока во второй плоскости изображения. Однако количественные изменения этих нарушений требуют соответствующих исследований.

ВЫВОДЫ

Использование в оптико-электронных приборах космических информационных систем многоэлементных световолоконных фоконов, согласованных пространственно по площади входными торцами — с разрешающей способностью объектива, а выходными торцами — с размерами светочувствительной площадки многоэлементного фотоприемного устройства, например ПЗС-фотопреобразователя, позволит повысить точность измерений в K раз. Многоэлементный световолоконный фокон здесь будет выполнять функции множительного элемента с коэффициентом K оптической редукции. Благодаря этому произойдет увеличение изображения предмета. При этом отпадает необходимость увеличения в K раз величины фокусного расстояния объектива.

При регулярной укладке волокон этих фоконов соблюдается условие строгой линейности трансформирования изображения объекта.

С точки зрения теории информации общая неопределенность информации (энтропия Больцмана), получаемая на основе допущений вероятности p_k , многоэлементных световолоконных фоконов снижена по сравнению с традиционными зеркально-линзовыми системами также из-за отсутствия перекрестных связей между световыми потоками смежных волокон фокона. Мера информации, вытекающая из наблюдений q_k перекрестных световых потоков из главного распределения p_k основных потоков, равна взвешенной усредненной энтропии на протяжении всего светового распределения.

1. Аксененко М. Д., Бараночников М. А. Приемники оптического излучения. — М.: Радио и связь, 1987.— 296 с.
2. Богданов А. А., Кузмин В. И., Мосевнина Л. Г. и др. Обеспечение спектрометрических характеристик многозональной системы «Фрагмент», сб. Оптико-электронные приборы в космических экспериментах. — М.: Наука, 1983.—С. 60—75.
3. Гаврилов Г. А., Сотникова Г. Ю. Коррекция частотно-контрастной характеристики фотоприемников на ПЗС // Техника кино и телевидения.—1988.—№ 3.—С. 22—25.
4. Готынян В. С., Буйницкий И. О., Минкевич Н. А. Опыт создания цифрового изображения Украины по космическим снимкам высокого разрешения // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 70—72.

5. Задубовский И. И., Красноголовый Б. Н. Качество изображения в электронных устройствах отображения информации. — Минск: Университетское, 1990.— 208 с.
6. Калмыков И. В., Кудрявцев О. В., Ломанов В. Г. и др. Передача аналоговых сигналов по волоконно-оптическим линиям связи // Радиотехника.—1982.—37, № 2.—С. 52—54.
7. Кононов В. И. Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 91—102.
8. Кузьмин В. И., Мосевнина Л. Г., Сероштанов В. М. Система первичного преобразования оптической информации. МСС «Фрагмент» // Оптико-электронные приборы в космических экспериментах. — М.: Наука, 1983.—С. 55—60.
9. Парняков Е. С., Мухаммад Рашик Улла Бейг Мирза. Пространственно-частотно-временные критерии оценки качества оптико-электронного автоколлимационного измерителя // Вісник астрон. школи.—2005.—5, № 1-2.—С. 246—250.
10. Порхун О. А. Застосування геоінформаційних систем (ГІС) при дешифруванні аерокосмічних зображень // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 106—109.
11. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения. — Л.: Машиностроение, 1989.—221 с.
12. Станкевич С. А. К оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических сигналов // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 103—105.
13. Ткаченко А. П., Кириллов В. И. Техника телевизионных измерений. — Минск: Вышэйша шк., 1976.—224 с.
14. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Рябоконенко С. А. и др. Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов на основе структурно-текстурного анализа // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 76—83.
15. Цифровое телевидение / Под ред. М. И. Кривошеева. — М.: Связь, 1980.
16. Яблонский Ф. М., Троицкий Ю. В. Средства отображения информации. — М.: ВШ, 1985.—200 с.

SOME PROBLEMS IN THE USE OF FIBER-OPTICAL ELEMENTS IN OPTICS-ELECTRONICAL IMAGING DEVICES OF SPACE INFORMATION SYSTEMS

E. S. Parnyakov, Mirza Muhammad Rasheeq Ullah Baig

The main problems of the use of fiber-optical elements in optical-electronical imaging devices of space information systems are considered. We propose to implement the space alignment of the resolution of the devices with measures of pixels of multi-element photo-converters by the scaling properties of fiber-optical elements.