

ФАЗО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕЛЕВИДЕНИЯ.

Фазо-временные преобразования пространственного спектра изображений осуществляют за счёт относительных периодических или квазипериодических во времени смещений проекции контролируемых видеоинформационных воздействий и структуры распределения светочувствительных элементов в датчиках телевизионного сигнала. В докладе рассмотрен частный оператор реализации и показана возможность адаптивных изменений протяжённости пространственного спектра контролируемой видеоинформации при использовании подобных преобразований.

Представленные в докладе результаты и соотношения обеспечивают основу для расчёта характеристик преобразования пространственного спектра в оптических трактах систем телевидения при выполнении относительных микросмещений по конкретным траекториям и с конкретными частотами перемещений. Практическая реализация подобных решений может дать существенное увеличение эффективности функционирования современных датчиков ТВ сигнала.

ФАЗО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ
В СИСТЕМАХ ТЕЛЕВИДЕНИЯ.

Аннотация. Фазо-временные преобразования пространственного спектра изображений осуществляют за счёт относительных периодических или квазипериодических во времени смещений проекции контролируемых видеoinформационных воздействий и структуры распределения светочувствительных элементов в датчиках телевизионного сигнала. В докладе рассмотрен частный оператор реализации и показана возможность адаптивных изменений протяжённости пространственного спектра контролируемой видеoinформации при использовании подобных преобразований.

Представленные в докладе результаты и соотношения обеспечивают основу для расчёта характеристик преобразования пространственного спектра в оптических трактах систем телевидения при выполнении относительных микросмещений по конкретным траекториям и с конкретными частотами перемещений. Практическая реализация подобных решений может дать существенное увеличение эффективности функционирования современных датчиков ТВ сигнала.

Одним из распространенных вариантов работы систем телевидения (СТВ) является вариант контроля объектов, относительное положение, фаза в пространстве раstra на светочувствительной поверхности в датчиках телевизионного (ТВ), которых по определенному закону изменяется во времени (в последовательности кадров). Фактически не является принципиальным за счет чего возникают при контроле видеoinформации фазовые преобразования: то ли это специфика перемещений контролируемых объектов по отношению к датчикам сигнала изображений СТВ, то ли это специфика перемещений самого датчика по отношению к контролируемым объектам. Сходные результаты может дать и вариант функционирования СТВ, когда между контролируемой зоной информационного пространства и датчиком сигнала введена среда, параметры которой изменяются (или их принудительно изменяют) во времени. С увеличением объема промежуточной среды (например, атмосферы) часто связано возникновение турбулентности в ее структуре.

Явление турбулентности отражается соответствующими относительными изменениями во времени положения контролируемых объектов на светочувствительной поверхности датчика сигнала СТВ. Это эквивалентно предварительному преобразованию многомерного спектра контролируемых

объектов и должно учитываться при проектировании СТВ, предназначенных для функционирования в условиях действия турбулентности.

Фактически аналогичные искажения могут возникать в СТВ с принудительной реализацией периодических, заданного типа, переключений положения проецируемых изображений в оптическом тракте. К тому же большинство современных СТВ работают в условиях действия на датчик сигнала ТВ изображений хаотических микросмещений в направлении, ортогональном поверхности земли. Соответствующие фазовые преобразования спектра видеоинформации отражаются при этом уменьшением разрешающей способности изображений в вертикальном по растру направлении, степень которого зависит от характеристик и параметров СТВ. Поэтому параметры и характеристики элементов и устройств обработки видеоинформации, включенных в СТВ, во всех подобных случаях должны быть выбраны с учетом структуры преобразованного многомерного спектра сигналов изображений.

Использование фазовых преобразований исходного воздействия, наряду с этим, позволяет осуществлять гребенчатую режекцию и анизотропные ограничения пространственного спектра в СТВ, что отражается, в конечном итоге, либо улучшением качества воспроизводимых изображений, либо упрощением требований к результирующим характеристикам операций обработки сигнала изображения в СТВ. Наличие фазовых преобразований визуальной информации весьма характерно, в частности, для функционирования зрительной системы человека. Это и скачкообразные движения глаз, и слежение, и тремор. С большой долей достоверности можно при этом предполагать, что, именно, тремор является причиной известной анизотропии в форме пространственной частотной характеристики глаза, отражением которой является снижение разрешающей способности под углом $\sim 45^\circ$ в пространстве визуального контроля.

Не вызывает сомнения в связи с этим, что использование элементов фазового преобразования контролируемой видеоинформации позволяет обеспечить радикальное увеличение эффективности функционирования современных СТВ, и, соответственно, ближайшей перспективой для СТВ является разумное сочетание элементов обработки сигналов в оптическом и электрическом трактах. С учётом этого актуальной в данное время является задача разработки методов анализа характеристик и параметров основных существующих типов преобразования видеоинформации в оптическом тракте.

В СТВ фактически осуществляют детерминированное отображение пространства значений многомерной входной функции распределения света в некоторое подпространство значений выходной функции распределения света. Такое отображение обычно считают линейным, однородным и, соответ-

ственно, относят к классу линейных операторов. Выходная функция распределения света является при этом входной для датчика ТВ сигнала и фактически во многом определяет результирующее качество работы СТВ в целом. Выходное распределение света синтезируют на выходе оптической системы (ОС) СТВ. Простейший вариант действия ОС - согласование пространственного масштаба выходного распределения света с пространственными размерами светочувствительной поверхности датчика ТВ сигнала. Указанное согласование является оператором с фиксированными характеристиками, не зависящими от координат информационного пространства. Поэтому в большинстве работ, посвященных исследованию линейных операторов, реализуемых ОС, чаще всего рассматривают лишь её действие в одномерном и, лишь изредка, в двумерном пространстве. Это обедняет представление о функциональных возможностях ОС в СТВ. Реальные ОС могут обеспечивать широкий спектр преобразований (обработки) видеоинформации на входе датчика ТВ сигнала за счет, например, отображения пространства x, y, t, λ в X, y, t, λ ; в X, Y, t, λ ; в X, Y, T, λ ; в X, Y, T, λ_0 и т.д. Учет всех функциональных возможностей действия оптических систем позволяет при проектировании и разработке СТВ различного назначения уже на оптическом входе датчика ТВ сигнала обеспечить эффективное сопряжение характеристик входного воздействия с характеристиками самого датчика с получением соответствующего выигрыша в качественных показателях работы СТВ в целом. Первичное преобразование видеоинформации при этом может реализовываться в ОС, а обратное с использованием цифровой обработки сигналов изображений в электрическом тракте СТВ.

Основные операторы, которые реализуются в ОС, это: масштабнo-пространственные, масштабнo-временные и фазо-временные преобразования; спектральное, спектрально-пространственное и спектрально-временное разделение видеоинформации на составляющие; пространственная, временная и пространственно-временная дискретизация и модуляция видеоинформации и др.

Тщательный анализ преобразований видеоинформации в ОС затруднен значительной сложностью математического моделирования соответствующих процессов. Поэтому целесообразно воспользоваться параметрическим описанием процесса преобразования сигналов в ОС. Чаще всего параметром целесообразно брать время. Однако параметром может быть и угол проецирования, расстояние между поверхностями в области объектов и изображений и т.д.

На выходе ОС в датчиках сигналов изображений СТВ с некоторым приближением реализуется дифференцируемые гомеоморфные отображения F_i множества $G \subset R^5_{x, y, t, z, \lambda}$ на множество $G_i \subset R^4_{x, y, t, \lambda}$ с якобианом не равным нулю на G .

Масштабные преобразования, которые осуществляются в ОС, в своем идеализированном виде проявляются изменениями характеристик объектов, фиксированных во времени и в пространстве.

Квазипериодические же фазо-временные преобразования видеоинформации могут осуществляться как за счет соответствующих смещений самих объектов, так и за счет организации необходимых смещений, например, в датчике сигнала изображения СТВ. Сущностью подобного типа преобразований, собственно, и являются относительные периодические во времени смещения контролируемых объектов в пространстве раstra на светочувствительной поверхности датчика сигнала. При этом характерны изменения положения объекта по отношению к оптической оси. Масштабные изменения координат затрагивают в таком случае и угол точки. Рассмотрим, например, оператор F смещения воздействия в ОС :

$$\begin{aligned} X &= x + \rho(t) \cos \varphi(t), & Y &= y + \rho(t) \sin \varphi(t) \\ x &= X - \rho(t) \cos \varphi(t), & y &= Y - \rho(t) \sin \varphi(t), & t &= t \end{aligned} \quad (1)$$

Исходное воздействие $O(x,y,t)$ представим в виде четырех составляющих:

$$\begin{aligned} O(x,y,t) &= O_I(x,y,t) + O_{II}(-x,y,t) + O_{III}(x,-y,t) + O_{IV}(-x,-y,t) \\ 0 &\leq x < \infty; 0 \leq y < \infty; 0 \leq t < \infty \end{aligned}$$

Найдем якобиан $\mathfrak{J}_c = \left| \frac{\partial(x,y,t)}{\partial(X,Y,t)} \right| = 1$.

Проанализируем частный вариант (частный оператор F_0) соотношения (1), когда

$$\begin{aligned} X &= x - a \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_0 t; & x &= X + a \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_0 t \\ Y &= y - a \cdot \sin \varphi \cdot \cos \omega_0 t; & y &= Y + a \cdot \sin \varphi \cdot \cos \omega_0 t, & t &= t \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $a = \text{const}$, $\omega_0 = \text{const}$ - фиксированное значение частоты. Будем считать, что исходному воздействию $O(x,y,t)$, т. е. при $a = 0$ (в соотношении(2)) соответствует спектр $S(\omega_x, \omega_y, \omega)$.

Тогда воздействию, преобразованному с использованием частного оператора F_0 , соответствует спектр:

$$\begin{aligned} S_P(\omega_x, \omega_y, \omega) &= \iiint_{G_i} O(X,Y,t) \exp(-j\omega_x \cdot a \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_0 t - j\omega_y \cdot a \cdot \sin \varphi \cdot \cos \omega_0 t) \cdot \\ &\cdot \exp(-j\omega_x X - j\omega_y Y - j\omega t) dXdYdt \end{aligned} \quad (3)$$

Известно, что

$$\begin{aligned} \exp(\pm iz \cdot \sin t) &= \pm \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(z) \cdot \exp(\pm imt) = J_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left[J_{2k}(z) \cos 2kt \pm \right. \\ &\left. \pm iJ_{2k-1}(z) \cdot \sin(2k-1) \cdot t \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Принимая во внимание (4), представим выражение (3) следующим образом:

$$\begin{aligned}
S_P(\omega_x, \omega_y, \omega) = & J_0(\omega_x a \cdot \cos \varphi + \omega_y a \cdot \sin \varphi) \cdot \iiint_{G_i} O(X, Y, t) \cdot \exp(-j\omega_x X - j\omega_y Y) \cdot \\
& \cdot \exp(-j\omega t) dXdYdt + \iiint_{G_i} O(X, Y, t) \cdot \left\{ 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left[J_{2k}(\omega_x \cdot a \cdot \cos \varphi + \right. \right. \\
& \left. \left. + \omega_y \cdot a \cdot \sin \varphi) \cdot \cos 2k\omega_0 t - jJ_{2k-1}(\omega_x a \cdot \cos \varphi + \omega_y \cdot a \cdot \sin \varphi) \cdot \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot \sin[2k-1)\omega_0 t] \right] \right\} \cdot \exp(-j\omega_x X - j\omega_y Y - j\omega t) dXdYdt
\end{aligned} \tag{5}$$

Будем считать, что граничное значение частоты трёхмерного спектра воздействия по временному направлению отражается значением ω_g и $\omega_g < 0,5 \omega_0$. При выполнении данного условия появляется возможность разделения слагаемых в соотношении для спектра (5). В частности, селекция первого слагаемого, т.е. низкочастотной составляющей спектра по временному направлению может быть в данном случае практически осуществляться за счёт подавления временных составляющих спектра, превышающих значение $0,5 \omega_0$ ($\sim \geq 0,5 \omega_0$). Необходимое подавление второго слагаемого (высокочастотной составляющей спектра по временному направлению) обеспечивается в реальных СТВ при использовании накопления формируемого на выходе ПСС сигнала изображения во времени. Процессу накопления в течение каждого кадра, например, с прямоугольной импульсной характеристикой (типа $rect\left(\frac{t}{0,5T_n}\right)$) соответствует при этом ограничение протяжённости спектра по временному направлению, специфика характеристики которого определяется функцией $\text{sinc}(\omega \cdot 0,5T_n)$. При разработке конкретных решений по разделению рассмотренных составляющих следует учитывать возможности реализации в СТВ ограничений протяжённости временного спектра сигнала изображений как в процессе накопления соответствующего потенциального рельефа светочувствительными элементами датчика ТВ сигнала, так и с использованием специальных фильтров в его электрическом тракте. Если частота среза (ω_s) фильтра низких частот (по временному направлению, т.е. в последовательности кадров), осуществляющего разделение указанных низкочастотной и высокочастотной составляющих, соответствует требованию $\omega_g < \omega_s \leq 0,5 \omega_0$, то выделяют низкочастотную (по пространственному направлению) составляющую спектра преобразованной видеoinформации:

$$\begin{aligned}
S_P(\omega_x, \omega_y, \omega) = & J_0(\omega_x a \cdot \cos \varphi + \omega_y a \cdot \sin \varphi) \cdot \iiint_{G_i} O(X, Y, t) \cdot \exp(-j\omega_x X - j\omega_y Y) \cdot \\
& \cdot \exp(-j\omega t) dXdYdt = J_0(\omega_x a \cdot \cos \varphi + \omega_y a \cdot \sin \varphi) \cdot S(\omega_x, \omega_y, \omega)
\end{aligned} \tag{6}$$

В соответствии с соотношением (6) пространственный спектр выделенной низкочастотной (по временному направлению) составляющей отличается от спектра исходного

воздействия умножением на функцию нулевого порядка $J_0(\omega_x a \cdot \cos \varphi + \omega_y a \cdot \sin \varphi)$.

Графики некоторых из функций Бесселя относительно низкого порядка представлены на рис.1.

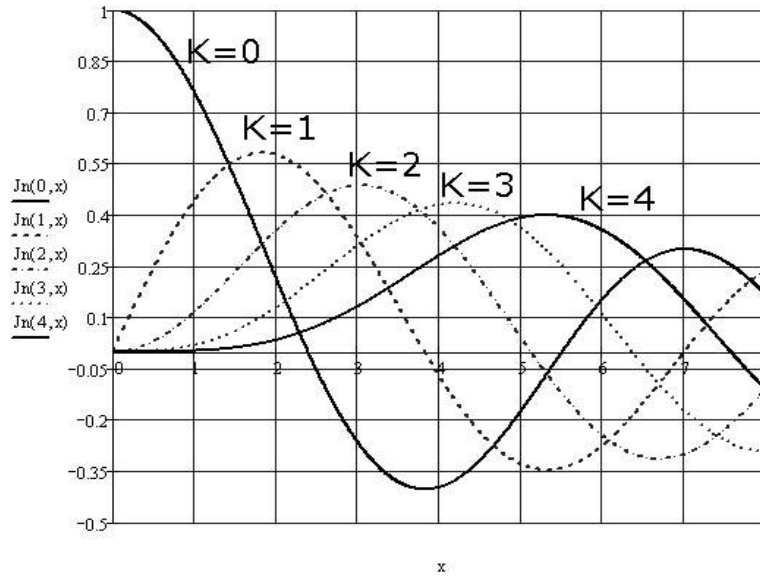


Рисунок.1. Графики функций Бесселя

Общий вид функции Бесселя $J_0(z)$, представленной на данном рисунке, свидетельствует о том, что её уровень существенно падает с увеличением аргумента z . За счёт этого имеет место уменьшение протяжённости исходного пространственного спектра видеоинформационного воздействия (видеоинформации). Следовательно, заданные изменения во времени фазы трансформируются при использовании накопления (низкочастотной фильтрации по временному направлению) в ограничения пространственного спектра видеоинформации.

На физическом уровне это объяснимо. Фактически в данном случае имеет место относительное падение энергии разностных (для изменений во времени положений воздействия) пространственных составляющих видеоинформации, обусловленное наличием усреднения во времени. Наличие таких составляющих сопряжено, в первую очередь, с тонкой пространственной структурой поступающей видеоинформации. Проанализируем специфику возникающих ограничений протяжённости пространственного спектра видеоинформации. Амплитуда функции $J_0(\omega_x a \cdot \cos \varphi + \omega_y a \cdot \sin \varphi)$, определяющей указанные изменения пространственного спектра, зависит от аргумента $z = \omega_x a \cdot \cos \varphi + \omega_y a \cdot \sin \varphi$. В частотном пространстве определим местоположение максимальных значений аргумента z . Соответственно находим:

$$\frac{dz}{dt} = -\omega_x \cdot a \cdot \sin \varphi + \omega_y \cdot a \cdot \cos \varphi = 0, \quad \omega_y = \omega_x \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad . \quad (7)$$

Местоположение же нулевых значений аргумента z определим из уравнения:

$$\begin{aligned} z &= \omega_x a \cdot \cos \varphi + \omega_y a \cdot \sin \varphi = 0, \\ \omega_y &= \omega_x \cdot \operatorname{ctg} \varphi = \omega_x \cdot \operatorname{tg} (\varphi + 0,5 \cdot \pi). \end{aligned} \quad (8)$$

Следовательно, максимальная величина ограничения в частотном пространстве протяжённости пространственного спектра локализована в рассматриваемом случае в пределах линии $\omega_y = \omega_x \cdot \operatorname{tg} \varphi$, т.е. совпадает с направлением изменения положения воздействия во времени. В ортогональном же указанному направлению, т.е., согласно (8) по линии $\omega_y = \omega_x \cdot \operatorname{tg} (\varphi + 0,5 \cdot \pi)$, протяжённость пространственного спектра не затрагивается и эквивалентна исходной.

Рассмотренная специфика действия фазо–временных преобразований выявляет возможность локальных в области пространственных частот ограничивающих преобразований структуры сечения (по фиксированному уровню) характеристики пространственного спектра сигналов изображений в СТВ. Изотропная форма структуры такого сечения может быть трансформирована в анизотропную. На рис.2а., в частности, показан идеализированный вариант изменения фазы проецируемого видеоинформационного воздействия (траектория движения отдельной фиксированной точки воздействия) во времени. Показанные изменения фазы периодически повторяются с достаточно высокой частотой. В режиме накопления сигнала изображения во времени возникают изменения в структуре сечения пространственного спектра сигнала изображения. Специфика действия данного частного варианта фазо–временных преобразований на форму такого сечения качественно представлены графиками рис.2б, первый из которых соответствует исходному, а второй преобразованному видеоинформационному воздействию.

Необходимые периодические во времени изменения относительной фазы видеоинформационного воздействия могут быть реализованы за счёт отдельного управления его относительным положением, например, по горизонтали и вертикали. Другой вариант реализации траектории относительных перемещений отличается тем, что последовательные микросмещения выполняют лишь в заданных направлениях. Причём относительные смещения воздействий по

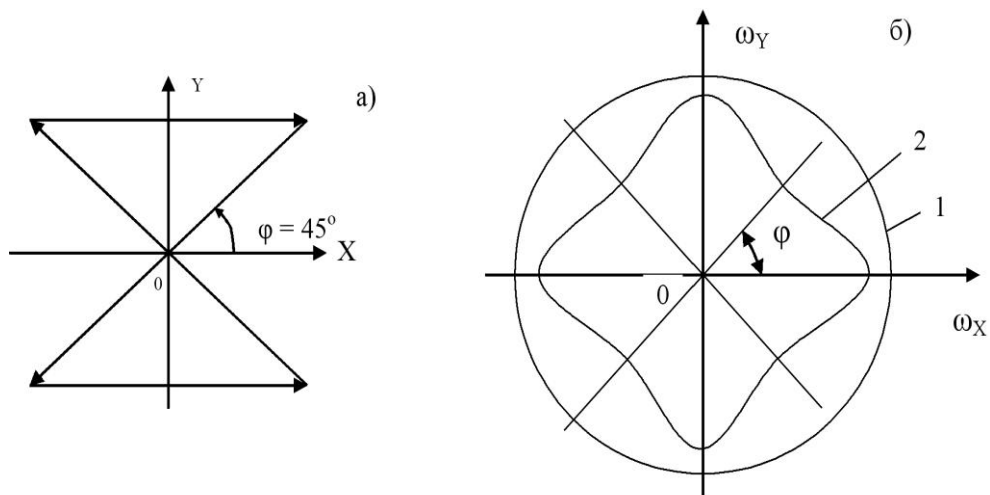


Рисунок.2. Фазо-временные преобразования видеоинформационного сигнала:

а) траектория изменения фазы анализа сигнала в ПСС;

б) форма сечения пространственного спектра исходного (1) и преобразованного (2) сигналов

каждому из направлений могут осуществляться отдельно во времени и с возвратом в исходное ($x = 0, y = 0$) положение.

В качестве иллюстрации на рис.3а показаны две взаимортогональные траектории под углом в 45° и 135° к оси $0x$.

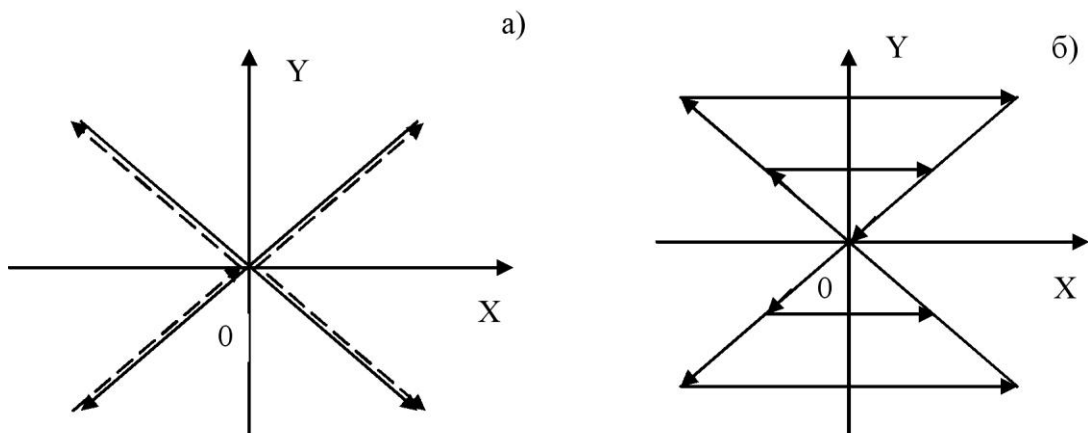


Рисунок.3. Варианты микросмещений (а,б) видеоинформационного сигнала во времени по взаимортогональным траекториям.

Динамические вариации параметрами относительных микросмещений (a, φ, ω_0) позволяют адаптивно изменять характеристики СТВ. Одним из подобных вариантов является введение (включение) микросмещений в моментах передачи фрагментов изображений, провоцирующих появление перекрёстных искажений между составляющими спектра структуры дискретизации (матрицы светочувствительных элементов датчика ТВ сигнала) и составляющими пространственного спектра видеоинформационного воздействия. Прототипом

подобных решений является вариант, предложенный в работе 1 . Перспективным следует также признать использование относительных микросмещений для адаптивного увеличения разрешающей способности матричных датчиков ТВ сигнала 2 . В содержании доклада рассмотрена специфика реализации СТВ подобного типа. Показано, что несущее высокочастотное колебание частоты ω_0 , входящее в структуру оператора F_0 (соотношение (2)) может модулироваться во времени, например, по амплитуде (показано на рис.3б) с сопутствующими изменениями характеристик преобразования пространственного спектра, соответствующего текущему сигналу изображения.

Представленные в докладе результаты и соотношения обеспечивают основу для расчёта характеристик преобразования пространственного спектра в системах с реализацией микросмещений по конкретным траекториям и с конкретными частотами перемещений. Практическая реализация подобных решений может дать существенное увеличение эффективности функционирования современных датчиков ТВ сигнала.

Литература

1. Безруков В.Н., Ваниев А.Г., Новаковский С.В. Способ развёртки телевизионного изображения электронным лучом в однострубочных камерах цветного телевидения со штриховыми цветофильтрами и устройство для его осуществления // А.С. СССР №1424138 МПК НО4 №9/07.
2. Безруков В.Н. Способ формирования телевизионного сигнала // А.С. СССР №1100754 МПК НО4 №9/04.