



АЭРОФОТОТОПОГРАФИЯ

УДК 528.711.1(202)

© Б. Н. Родионов, 1992

ТЕЛЕРЕПОРТАЖНАЯ АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Б. Н. РОДИОНОВ

Телерепортажная аэросъемка (ТРА) — это новый вид дистанционного зондирования Земли для контроля состояния агроресурсов. Он заключается в съемке сельскохозяйственных объектов с легких воздушных судов портативными телевизионными камерами с записью изображений на переносной видеомагнитофон. Одновременно оператор-бортнаблюдатель диктует и записывает на видеофильм комментарий о степени развития растений, их повреждениях и аномалиях на полях. Видеофильм демонстрируется на бытовых телевизорах. Этот вид дистанционного зондирования сочетает достоверность инструментальных наблюдений с оперативностью телевизионного репортажа и доступен широкому кругу пользователей.

Первые опыты ТРА проведены в Московском институте инженеров землеустройства в 1980—1982 гг. Использовалась отечественная бытовая видеоаппаратура «Электроника» и «Сатурн». В дальнейшем ТРА получила развитие во Всесоюзном научно-исследовательском центре по созданию и эксплуатации автоматизированной информационно-управляющей системы «АИУС-агроресурсы».

Маршрутную перспективную съемку обычно выполняют с постоянным фокусным расстоянием объектива ТВ-камеры. При необходимости оператор выделяет детали. Действуя трансфокатором, он увеличивает масштаб изображения и, отслеживая «движение» местности, вручную компенсирует его сдвиг. Большой диапазон разрешений позволяет оценивать состояние как отдельных сельскохозяйственных культур, так и поля в целом.

В 1988—1989 гг. космонавтами М. Х. Манаровым, В. Г. Титовым, С. К. Крикалевым, А. А. Волковым по

методике автора была проведена опытная телерепортажная космическая съемка с орбитального комплекса «Мир» с прямой передачей изображения по каналам космической и наземной связи непосредственно пользователям: Киевскому и Северо-Казахстанскому филиалам ВНИЦ «АИУС-агроресурсы». Применялась штатная бортовая телевизионная аппаратура «Нива» в составе ТВ-камеры, видеомагнитофона, монитора, линии связи. Детальность изображения составила 40—50 м на местности при ширине маршрута 25 км. Полученные ТВ-снимки позволяют оценить крупные аномалии в развитии сельскохозяйственных культур, сезонные вариации водохранилищ и систем орошения, очаги засоления, зоны воздействия загрязнений вокруг населенных пунктов и другие экологические факторы. В 1991 г. эти эксперименты были продолжены с использованием аппаратуры компенсации сдвига изображения, что позволило получить разрешение на местности 10 м.

Таким образом, можно говорить о том, что складывается самостоятельный вид дистанционного зондирования — телерепортажная аэрокосмическая съемка (ТРАКС). Ее особенности заключаются в применении серийной видеоаппаратуры репортажного назначения, передаче по каналам широкоэшелонного телевидения, доступности ТВ-информации широкому кругу пользователей. Все это делает телерепортажную аэрокосмическую съемку дешевым средством оперативного дистанционного зондирования.

Широковещательное телевидение достигло такого технического совершенства, что ТРАКС вполне может конкурировать со специальными системами сканерного телевидения. Применение матриц ПЗС, автоматической фокуси-

ровки и регулирования экспозиции позволяет получать ТВ-снимки, по геометрическим свойствам близкие к фотографическим и превосходящие сканерные снимки по возможности варьирования разрешением и охватом местности, а также по адаптивности и яркости объектов.

Развиваются упрощенная экспресс-обработка снимков ТРАКС с помощью перспективных сеток, накладываемых на экран телевизора, и цветовых эталонов, а также машинная обработка телевизионных сигналов, вводимых в ЭВМ. Обработка заключается в выделении классов наблюдаемых объектов, их оконтуривании и определении площадей, картографическом представлении данных, составлении сводных доносений о состоянии культур на отдельных полях и экологической обстановке. Точность и достоверность результатов обработки определяются метрологическими особенностями исходных ТВ-изображений, а также аппаратом иконометрических процедур, моделирующих процессы ТРАКС, и интерпретации данных.

Свойства телерепортажных изображений раскрываются при анализе взаимно однозначного соответствия между элементами местности (прообраза) и элементами изображения (образа). Такая связь является проективной и выражается дробно-линейной функцией

$$p = \frac{aP + b}{cP + 1} + \delta p; \quad (1')$$

$$P = \frac{p - \delta p - b}{a - c(p - \delta p)}, \quad (1'')$$

где p и P — параметры элементов изображения и его прообраза; a, b, c — нормированные параметры проективного преобразования $P \rightleftharpoons p$; δp — поправка.

Символы p и P могут обозначать геометрические координаты точек изображения и местности и энергетические координаты — яркости соответствующих этим точкам элементов разложения телевизионного раstra и их прообразов. Если рассматриваются геометрические координаты, то δp есть фотограмметрическая дисторсия. Когда речь идет об энергетических координатах, то δp уместно назвать фотометрической дисторсией. Выражение (1') формализует так называемую прямую задачу, а (1'') — обратную.

Каждый элемент цветного телевизионного изображения в данный момент времени T характеризуется пятью координатами: x, y — абсцисса и ордината центра элемента; B_c', B_z', B_k' — яркости синей, зеленой и красной компонент свечения экрана. В черно-белом изображении яркости цветных компонент заменяются одной нейтральной яркостью B' . Каждый элемент местности, отображенный на экране телевизора, характеризуется шестью координатами: X, Y, Z — абсцисса, ордината и аппликата центра элемента; B_c, B_z, B_k — яркости, наблюдаемые в данный момент с летательного аппарата в стандартном синем, зеленом и красном цвете.

На схеме построения телевизионной проекции местности (рис. 1) обозначено: S, SO, f — узловая точка объектива, его оптическая ось и задний отрезок ТВ-камеры соответственно; SN — вертикаль; Z_s — высота съемки; α — угол наклона ТВ-камеры; \vec{W} — путевая скорость носителя; 1234 — воображаемая плоская прямоугольная сетка на местности; $1'2'3'4'$ — ее проекция на экране видеоконтрольного устройства (телевизора); $1''2''3''4''$ — мнимый аналог проекции сетки на условной плоскости, отстоящей от S на расстояние f' ; M — точка местности; Z — ее превышение; M, M', M'' — изображение точки местности на экране, ее оптическая проекция в ТВ-камере, эквивалентная M проекция на условной плоскости; $\bar{B}, \bar{E}, \bar{B}'$ — видимая яркость точки местности, освещенность ее оптического изображения и яркость свечения ее изображения на экране; N, n — точки надира; O, o, o', o'' — главные точки; u — точка основания картины; uN и uO — главные вертикали картины и местности; $h_i h_i$ — линия видимого горизонта. Обозначены также необходимые системы декартовых координат. Оси абсцисс параллельны вектору путевой скорости \vec{W} и обратному ему вектору видимого относительного движения местности $\vec{W}_m = -\vec{W}$. Символами \vec{W} с индексами обозначены векторы движения точек оптического и телевизионного изображений. Символы sr и kr показывают направления строчной и кадровой разверток телевизионного раstra.

Геометрические характеристики телевизионного изображения. В упрощенном случае взаимная ориентация систем координат $NXYZ$ и $o'x'y'z'$ определяется матрицей $Q = \|a_{ij}\|$, элементы которой равны: $a_{11} = -1$; $a_{12} = a_{13} = a_{21} = a_{31} = 0$; $a_{22} = -\cos \alpha$; $a_{23} = a_{32} = -\sin \alpha$; $a_{33} = \cos \alpha$. В этом случае

$$\left. \begin{aligned} x &= K' \frac{aX}{cY + 1} + \delta y; \\ y &= K \frac{aY + b}{cY + 1} + \delta x; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

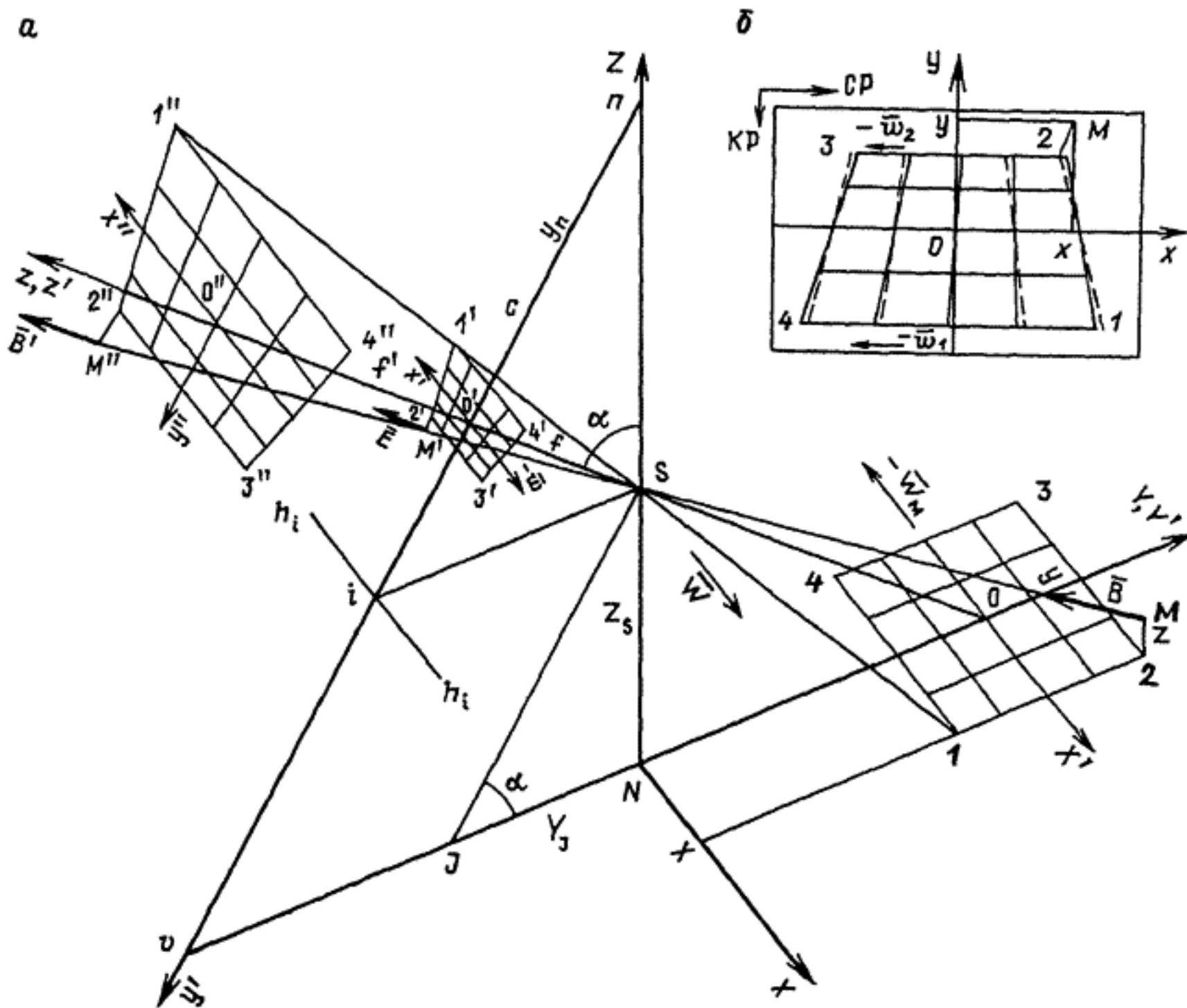


Рис. 1. Схема построения телевизионной модели местности

$$\left. \begin{aligned} x' &= (x - \delta x) K^{-1}; y' = (y - \delta y) K^{-1}; \\ X &= \frac{x' \sec \alpha}{a - cy'}; Y = \frac{y' - b}{a - cy'} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $K' = K \sec \alpha$; $K = l/l'$ — масштабные коэффициенты; l и l' — длина строк телевизионного раstra в видеоконтрольном устройстве (ВКУ) и ТВ-камере; $a = 1/m_c = f/(Z_s - Z)$ — масштаб оптического изображения в ТВ-камере в точке нулевых искажений ($x_c' = 0$; $y_c' = -f \operatorname{tg} \alpha/2$); $b = -y_n' = -f \operatorname{tg} \alpha$ — ордината точки надира; $c = -Y_I = (Z_s - Z)/\operatorname{tg} \alpha$; $\delta x, \delta y$ — поправки.

Формулы (2) применяются для расчета перспективных сеток, накладываемых на экран ВКУ или воспроизводимых в ТВ-растре, формулы (3) — при аналитической интерпретации данных телерепортажной аэросъемки на ЭВМ.

Поправки в координаты $\delta x, \delta y$ складываются из трех компонент

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \Delta x(W, \omega) + \Delta x(\alpha_x, \alpha_y, x) + \Delta x_i; \\ \delta y &= \Delta y(W, \omega) + \Delta y(\alpha_x, \alpha_y, x) + \Delta y_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Первые члены выражений (4) описывают искажения, вызываемые равномоментностью формирования телевизионного кадра. Под влиянием ли-

нейных и угловых движений носителя изображение прямоугольной сетки местности на ТВ-кадре деформируется. Вторые члены являются искажениями, возникающими вследствие отклонений на углы $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ осей системы $o'x'y'z'$ от номинала, задаваемого матрицей Q . Полные значения $\Delta x(W, \omega), \Delta y(W, \omega)$, а также $\Delta x(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z), \Delta y(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ могут быть подсчитаны по формулам, приведенным в монографии «Динамическая фотограмметрия» (М.: Недра, 1983). Доминирующим фактором, определяющим подобную деформацию, является перемещение носителя ТВ-камеры с путевой скоростью W по оси NX . Если другими движениями по их малости пренебречь, то можно написать

$$\left. \begin{aligned} \Delta x(W) &= -aWt(\cos \alpha - y \sin \alpha/f'); \\ \Delta y(W) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где t — время между моментами считывания ТВ-изображения в передающей трубке в точках с координатами $x=0, y=0$ (центр кадра) и x, y . Возникшая под влиянием W деформация схематически показана на рис. 1, б (пунктирные линии обозначают перспективу

сетки в неподвижных условиях). Так как ТРАКС производится при заданных высоте полета Z_s , угле наклона ТВ-камеры α и траекторной скорости носителя V , то если в среднем $V=W$ и $Z=0$, деформацию $\Delta x(W)$ можно учесть и построить сетку так, как это показано на рис. 1, б сплошными линиями. При компенсации сдвига изображения поправками $\Delta x(W)$ можно пренебречь.

Последние члены в (4) выражают влияние нелинейности строчной и кадровой разверток изображения в ТВ-системе и оптической дисторсии объектива ТВ-камеры. Поправки Δx и Δy определяются по данным геометрической калибровки конкретного комплекта ТВ-аппаратуры. Калибровка заключается в воспроизведении контрольной сетки и измерении ее искажений на ТВ-изображении.

При определении площадей деталей местности по их ТВ-изображениям с помощью перспективных сеток возникают искажения из-за отклонения фактических Z_s , W и α от номинала. Такие отклонения обычно лежат в пределах $\pm 10\%$ и $\pm 3^\circ$ соответственно. Существенное влияние оказывают лишь погрешности в Z_s , так как они вызывают искажения масштаба того же порядка. Погрешности определения площадей по изображениям, как известно, равны погрешностям масштаба и, следовательно, в данном случае также не будут превышать 10% . Упомянутые погрешности в V и α искажают масштаб на $2-3\%$ и поэтому могут не учитываться.

Точность картографической обработки телерепортажных изображений с использованием формул (1) — (5) зависит от точности определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования ТВ-системы и погрешностей измерений самих изображений с учетом динамичности процесса съемки (см. упомянутую монографию).

Яркостные характеристики телерепортажного изображения. В телевидении зрительный эффект создается яркостью B' свечения люминофора на экране телевизора. Ее можно определить, прикладывая к экрану, например, люксметр, отсчет которого, соответствующий освещенности E' , пересчитывается в яркость по формуле $B' = E'/\pi$. Можно написать:

$$E' (B' (I (H (E (B) t)))) = E' (B). \quad (6)$$

Это обозначает, что E' есть функция яркости свечения экрана B' , являющаяся функцией видеосигнала I — функции количества освещения $H = Et$, где E — освещенность фотослоя передающей ТВ-трубки, создаваемая оптическим изображением точки местности M , имеющей в натуре видимую яркость B (см. рис. 1); t — время накопления заряда на фотослое — выдержка. Функциональные зависимости в (6) все линейные, за исключением $I(H)$, которая является проективной. Она описывается выражениями (1) при замене p на I и P на H .

В телевизионных камерах выдержка приблизительно соответствует времени накопления заряда на фотоэлектрическом сенсоре и равна $t = I/\nu$, где ν — частота кадров. Для данного ТВ-стандарта эта величина постоянная. Можно строить характеристическую кривую (ХК) телевизионного изображения по аналогии с ХК фотоизображения, откладывая на графике по оси абсцисс $\lg H = \lg E + \lg t$, а по оси ординат $\lg B' = \lg E' - \lg \pi$. Константы t и π сдвигают начало координат, а ХК представляет функцию $\lg B' (\lg E)$, где E — освещенность ТВ-сенсора.

Освещенность E есть функция параметров оптической системы передающей камеры, условий съемки и яркости B объекта в натуре. Для отдельного кадра все эти факторы, кроме B , могут быть выражены через некоторые константы, и поэтому их влияние также вызывает дополнительный сдвиг начала координат. Следовательно, ХК телерепортажного изображения можно представить как функцию $\lg B' (\lg B)$. При этом последняя дает сквозную характеристику аппаратуры ТРАКС и отображает свойства передающей телевизионной камеры, видеомagneтофона и телевизора данной конкретной комплектации. Регулировки в любом из этих звеньев меняют характеристические кривые и образуют их семейства (рис. 2).

Данные для построения ХК можно получить в результате калибровки ТВ-системы, аналогичной сенситометрическим испытаниям фотоматериалов. Калибровка выполняется с помощью светового эталона и набора сменных стекол разной нейтральной плотности и стандартных цветных свето-

фильтров. Стекла (светофильтры) устанавливаются на окно светового эталона, и с помощью люксметра контролируется яркость B свечения окна. ТВ-камеру наводят на окно и тем же люксметром контролируют яркость свечения телевизионного изображения B' на экране видеоконтрольного устройства (ВКУ). В результате получают таблицу значений функции $B'(B)$ и по этим данным строят графики $\lg B'(\lg B)$.

На рис. 2 показаны характеристические кривые аппаратуры «Электроника». Из примера видно, что ХК телерепортажной системы существенно нелинейны и по форме аналогичны кривым фотоизображения. Выделяются более или менее прямолинейные участки, где происходит квазипропорциональное воспроизведение яркостей, а в нижней и верхней ветвях ХК оно искажено. В результате регулировок меняется крутизна ХК. Она может быть, как в фотографии, охарактеризована тангенсом угла наклона относительно оси абсцисс или коэффициентом контрастности γ . Уместно также и понятие ширины участка пропорционального воспроизведения яркостей $L = \lg B_k - \lg B_n$, где $\lg B_k$ и $\lg B_n$ — отсчеты координат по оси абсцисс, соответствующие концу и началу квазипрямолинейного участка ХК. Если задаться критерием яркости $B_{с.к.р}$ свечения экрана, при котором имеет место тот или иной интерпретационный эффект, то можно говорить и о светочувствительности $S_{ТВ}$ аппаратуры ТРАКС.

Семейство ХК дает возможность подобрать режим регулировок, при котором изображение для решения задачи представляется наиболее информативным, и зафиксировать эти регулировки, чтобы в дальнейшем разновременные телерепортажные наблюдения были сопоставимы.

Телевизионное изображение, получаемое аппаратурой ТРАКС, по полю экрана неоднородно. Если наводить камеру на световое окно таким образом, чтобы оно отображалось на экране телевизора в разных его частях, то можно проконтролировать яркостные и цветовые искажения. Большие яркостные погрешности создаются главным образом аппаратурой воспроизведения. Поэтому при автоматизированной

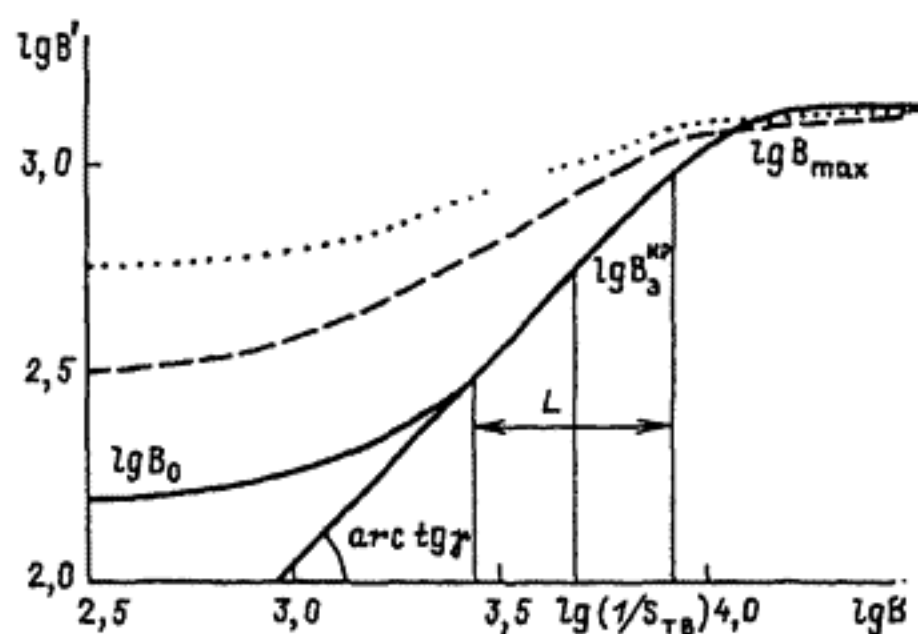


Рис. 2. Семейство характеристических кривых черно-белого телевизионного изображения при различных усилениях яркости

машинной обработке целесообразно строить характеристические кривые как функции $\lg I(\lg B)$, где I — значение видеосигнала на входе ВКУ. Такие кривые по форме аналогичны кривым $\lg B'(\lg B)$.

Графическая форма ХК удобна для наглядного представления свойств телерепортажного изображения. Для автоматизированной интерпретации необходимо функцию $I(B)$ выразить аналитически. Отображение $B \rightleftharpoons I$ является проективным и может быть на основании (1) записано так:

$$I = \frac{a'B + b'}{c'B + I}; \quad (7)$$

$$B = \frac{I - b'}{a' - c'I}, \quad (7')$$

где a' , b' , c' — нормированные параметры проективного преобразования.

Их можно определить, решив систему из трех уравнений (7) для трех точек ХК в ее начале, середине и конце. Если с помощью найденных таким образом параметров решить уравнение (7) для других точек ХК, то получается рассогласование: $\delta I = I' - I$, где I' — вычисленные, а I — измеренные значения видеосигнала. Дисторсия δI должна учитываться при аналитической обработке телерепортажных изображений, когда она по величине превышает погрешности приведенной выше фотометрической калибровки ТВ-системы.

Опыт показывает, что при решении практических задач число необходимых выделяемых на изображении классов редко бывает больше десяти. Это требование вполне обеспечивается ТРАКС по большинству решаемых задач.