Записки Ленинградского Горного Института, том XIII, вып. 2, 1940
Annales de l'Institut des Mines à Leningrad, vol. XIII, liv. 2, 1940

Оптический нониус и его применение в угломерных инструментах

Ассистент Н. А. Гусев

Der optische Nonius und seine Anwendung in Winkelmessinstrumenten

Assist. *N. A. Gussew*

Введение

При производстве геодезических и маркшейдерских теодолитных работ высокая точность отсчитывания по лимбам горизонтального и вертикального кругов осуществляется, как известно, при помощи верньера, штрихового или шкалового микроскопа, или микроскоп-микрометра, или оптического микрометра. Точность этих отсчетных приспособлений достигает до 10″ для верньера, 6″—шкалового микроскопа, 2″— микроскоп-микрометра и 0″,1— оптического микрометра. Точность последнего— 0″,1, как показала практика, номинальная и не соответствует точности измерения углов. Ошибка в измерении углов теодолитом с оптическим микрометром указанной точности достигает до 1″, а иногда и больше. Происходит это, видимо, по причине наличия в теодолите инструментальных ошибок и несовершенства устройства оптического микрометра. Теодолиты с оптическим микрометром все же дают высокую точность измерения углов и кроме этого имеют еще ряд весьма существенных преимуществ перед другими, как то: компактность, прочность, удобство в обращении и работе, благодаря чему появилась возможность повысить производительность измерений. Все перечисленные качества удалось совместить у одного и того же инструмента благодаря сведению диаметрально противоположных делений лимба к одному и тому же полю зрения отсчетного микроскопа, применения оптического микрометра и стеклянного лимба. Теодолиты с оптическим микрометром имеют сложное устройство оптико-механических деталей, требующих выполнения с весьма высокой точностью, поэтому, естественно, изготовление их встречает затруднения технического характера и требует большой затраты труда.

Отсчетные приспособления: верньер, штриховой и шкаловой микроскопы и микроскоп-микрометр уступают оптическому микрометру не только по точности, но также в техническом и производственном отношениях. Теодолиты с перечисленными отсчетными приспособлениями имеют большие размеры, возрастающие с увеличением точностей отсчитывания, дают значительно меньшие удобства в работе, а также значительно меньшую производительность измерений по сравнению с угломерными инструментами, имеющими оптический микрометр.

Ниже дается описание и теория нового, еще неизвестного в практике отсчетного приспособления— оптического нониуса. Практическое осуществление оптического нониуса не имеет ничего общего с обыкновенными верньерами, теория же его, хотя и построена на основном принципе обыкновенного верньера, все же

в конечном итоге существенно отличается от последнего. Известные нам верньеры являются отдельной деталью измерительного прибора в виде особой шкалы, построенной по известному правилу. Этот верньер или непосредственно прилегает к основной шкале (лимбу) инструмента, или устанавливается в фокальной плоскости окуляра отсчетного микроскопа (нониус-микроскоп).

Оптический нониус не является отдельной деталью инструмента. Он получается от двух изображений диаметрально противоположных делений лимба, сведенных при помощи простой оптической системы к одной и той же фокальной сопряженной плоскости. Изображения противоположных делений лимба имеют разное увеличение, подчиненное определенным условиям, вытекающим из теории построения обычного нониуса. Соотношение увеличений берется такое, чтобы при заданной точности t нониуса было соблюдено условие $L'-l'=t$, где L' и l' — величины изображений противоположных делений лимба.

Таким образом, нониуса, как такового, в обычном понятии не существует, а имеются изображения противоположных делений лимба с разным увеличением, функционально зависимым от данных для построения нониуса заданной точности.

Оптический нониус открывает возможность создания нового угломерного инструмента с перечисленными выше качествами теодолита с оптическим микрометром за исключением точности отсчитывания. Точность оптического нониуса, как это будет выяснено ниже, может быть увеличена вдвое в сравнении с обычным верньером, т. е. доведена до 5″.

Теория оптического нониуса

Нам известно, что для осуществления нониуса с заданной точностью t необходимо, чтобы было выполнено условие $t=\frac{L}{n}$ или $t=L-l$, где L — цена деления лимба, l — цена деления нониуса и n — число делений в дуге нониуса, вмещающей на лимбе $n-1$ делений. Из условия построения нониуса и рис. 1 очевидно, что k делений нониуса в интервале от 0 до n отличаются от k делений лимба на величину $kL-kl=k(L-l)=kt$. Пользование таким нониусом общеизвестно и пояснения не требует.

Оптический нониус осуществляется двумя неодинаково увеличенными изображениями равных между собой диаметрально противоположных делений лимба. В основание расчета этого нониуса положено также основное условие построения верньера, т. е. $L'(n-1)=l'n$, где L' и l' — обозначения нам уже известные, равные в линейной мере:

$$L'=L\cdot v_L$$

и

$$l'=Lv_l.$$

Увеличения v_L и v_l берутся такие, чтобы было выполнено условие верньера

$$L'(n-1)=l'n$$

или

$$Lv_L(n-1)=Lv_ln, \qquad (1)$$

где $n=\frac{L'}{t}$ или $\frac{L}{t}$, так как L' в градусной мере равно L. Из равенства (1) следует, что

$$v_L:v_l=n:(n-1). \qquad (2)$$

Таким образом для образования оптического нониуса должны быть выполнены условия, поставленные равенствами (1) и (2).

Практически оптический нониус осуществляется при помощи двух объективов (для каждой стороны лимба по одному объективу) и призм. Объективы образуют изображения L' и l' противоположных делений лимба с увеличением соответственно v_L и v_l, а призменная система сводит эти изображения к одной общей плоскости, развертывает их и разделяет тонкой линией. В полученной таким образом плоскости оптического нониуса устанавливается стеклянная прозрачная плас-

тинка с нанесенным на ней отсчетным индексом (ноль-штрихом) *ii* (рис. 2 и 3). Положение этого индекса не произвольное, а строго определенное. Он должен занимать то положение, которое имеют изображения одноименных штрихов противоположных делений лимба при их совмещении. Например, индекс должен совпадать с изображением штрихов лимба 0° и 180°, если их совместить. При таком устройстве оптического нониуса, если мы повернем алидаду угломерного инструмента на некоторый угол β относительно лимба, то изображения одноименных штрихов последнего раздвинутся в противоположные стороны на угол $\beta_L+\beta_l \cong \cong 2\beta_L$, а индекс *ii* займет какое-то среднее положение между одноименными штрихами. Понятно, что индекс может занимать строго среднее положение между одноименными штрихами лишь в том случае, когда $v_L=v_l$. В нашем случае в основу построения положено $v_L \neq v_l$, а потому индекс не может занимать строго среднее положение. По причине неравенства увеличений отсчет для какого-то произвольно взятого направления не будет равен отсчету по индексу плюс половина отсчета по оптическому нониусу, а будет равен отсчету по индексу на лимбе *I* плюс *а*, т. е. $I+a$, или отсчету по индексу на лимбе *II* плюс *б*, т. е. $II+180+б$ (см. рис. 2 и 3). На рис. 2 и 3 обозначены через *I* и *II* изображения противоположных делений лимба, из которых *II* пользуемся как прямым верньером (*I* можно также пользоваться как обратным верньером). Значения *а* и *б*, как мы уже доказали, между собой не равны, но могут быть определены при помощи оптического нониуса. На самом деле, из рис. 2 и 3 очевидно, что

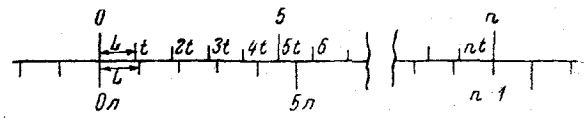


Рис. 1.

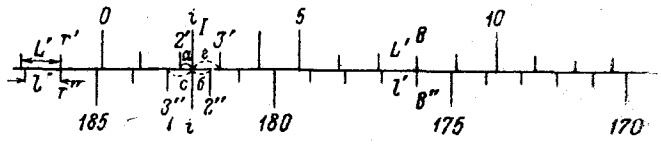


Рис. 2.

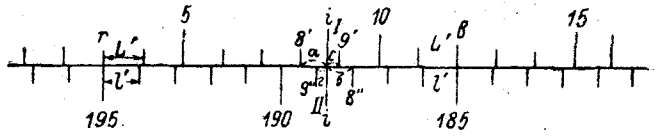


Рис. 3.

$$a+б=L'k-l'k=k(L'-l')$$

или

$$a+б=k\cdot t. \qquad (3)$$

Но $a=\frac{1}{2}A\cdot v_L$ и $б=\frac{1}{2}A\cdot v_l$ по условию построения оптического нониуса, где A — интервал между ближайшими одноименными диаметрально противоположными штрихами лимба, поэтому

$$a:б=v_L:v_l. \qquad (4)$$

Из равенства (2) нам известно, что $v_L:v_l=n:(n-1)$, поэтому

$$a:б=n:(n-1). \qquad (5)$$

Составим из равенства (5) производную пропорцию

$$\frac{a}{a+б}=\frac{n}{2n-1}$$

и найдем из нее значение *а*:

$$a=(a+б)\frac{n}{2n-1}. \qquad (6)$$

Подставив в уравнение (6) значение $(a+б)$ из равенства (3), получим:

$$a=k\cdot t\,\frac{n}{2n-1}=k\cdot\frac{t\cdot n}{2n-1}.$$

Но $tn = L'$, поэтому

$$a = k \cdot \frac{L}{2n-1}. \qquad (7)$$

Очевидно, что $\frac{L'}{2n-1}$ есть точность оптического нониуса, которую обозначим через t', тогда получим окончательно

$$a = k \cdot t'. \qquad (8)$$

Аналогичную формулу получаем и для $б$, т. е. $б = k't'$.

Из равенства (7) следует, что при целом значении числа делений n точность нониуса t' будет числом дробным и таким нониусом неудобно пользоваться. Чтобы сделать t' целым, наперед заданным числом, нужно n подчинить значениям L' и t', т. е. брать за n то число, которое получится из формулы $t' = \frac{L'}{2n-1}$. Оно будет равно

$$n = \frac{L'}{2t'} + \frac{1}{2}. \qquad (9)$$

Из (9) очевидно, что n будет отличаться от целого числа на половину единицы. Построение такого нониуса так же просто выполнимо, как и с n целым. Для этого делается такое увеличение v_L и v_l, чтобы в плоскости оптического нониуса $2n-1$ делений одной стороны лимба совпадали с $2n$ делениями другой стороны его. Точность нониуса, построенного таким образом, в два раза больше расчетной t', по нему непосредственно можно брать отсчеты с точностью до $^1/_2 t'$. Как это практически осуществляется, будет сказано ниже.

Из рис. 2 и 3 также очевидно, что отсчет по оптическому нониусу для того же направления может быть получен через $в$ и $г$. Доказательство аналогично приведенному для $а$.

Не останавливаясь пока на теории оптического нониуса, поясним, как берутся по нему отсчеты. Для этого воспользуемся рисунками 4, 5, 6 . . . оптического нониуса с расчетной точностью $t' = 30''$, построенного по данным $L' = 10'$ и $n = 10{,}5$. Пояснение дадим начиная с исходного положения, когда индекс совпадает с совмещенными одноименными штрихами, в нашем случае со штрихами 6° и 186° (рис. 4). Будем вращать алидаду с исходного положения в направлении движения часовой стрелки. Понятно, изображения противоположных делений лимба будут при этом перемещаться в разные стороны. Очевидно, что первоначальное совмещение получится от первого штриха нониуса, считая от индекса, т. е. при $k = 1$. Отсчет по нониусу при этом будет

$$a = kt' = t'.$$

В нашем случае $t' = 30''$, а потому $a = 30''$ и отсчет по лимбу и нониусу будет равен 6°00′30″ или 186°00′30″ (рис. 5).

Второе совмещение получится от второго штриха при $k = 2$ и отсчет будет равен $6° + 2t' = 6°01'00''$ или 186°01′00″ (рис. 6) и т. д.

для $k = 3$ будем иметь отсчет 6°01′30″ (рис. 7)

. . . . . .

. . . . . .

для $k = 10$ будем иметь отсчет 6°05′00″ (рис. 8).

Чтобы при взятии отсчетов по нониусу не считать число штрихов k в промежутке между индексом и совпадающим делением, что практически неудобно, на стеклянной пластинке наносится шкала, цена деления которой делается равной $l' + t'$ (в линейной мере). Эта шкала распространяется вправо и влево от индекса и нулевое деление ее совпадает с последним. На ней надписываются через несколько делений (в нашем случае через два деления) числа в минутах, соответствующие отсчету kt' (на рисунках $kt' = k \cdot 30'' = {}^1/_2 k$) по нониусу для данного штриха с номером k. При таком устройстве шкалы совпадающие деления нониуса и лимба

обязательно окажутся против того штриха ее, который имеет тот же номер k, что и совпадающее деление нониуса. Поэтому отсчеты могут быть взяты непосредственно по шкале с точностью t'.

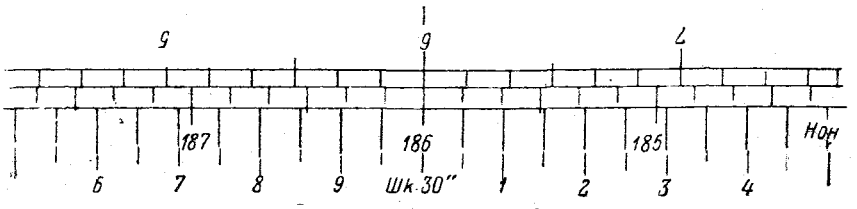


Рис. 4.

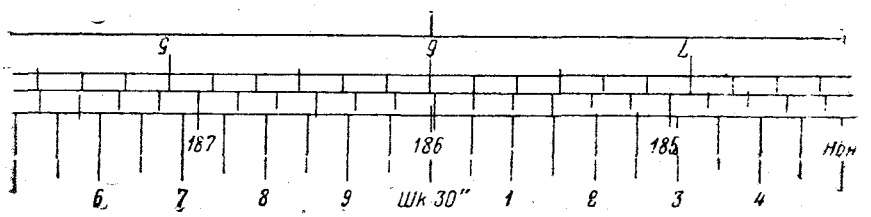


Рис. 5.

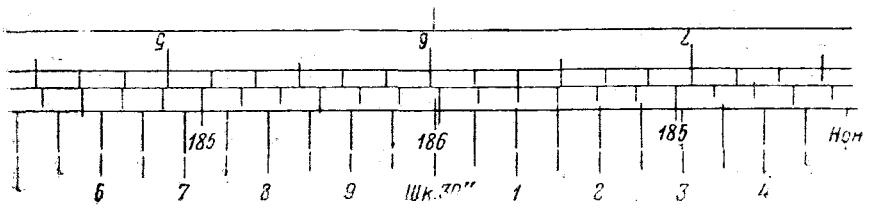


Рис. 6.

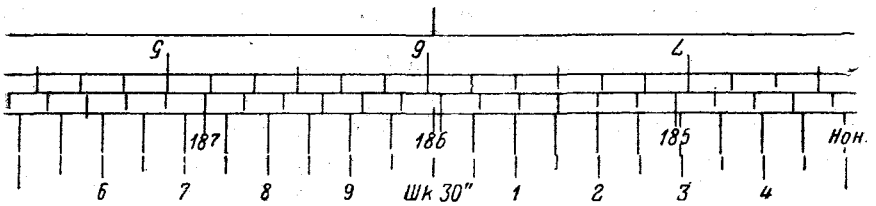


Рис. 7.

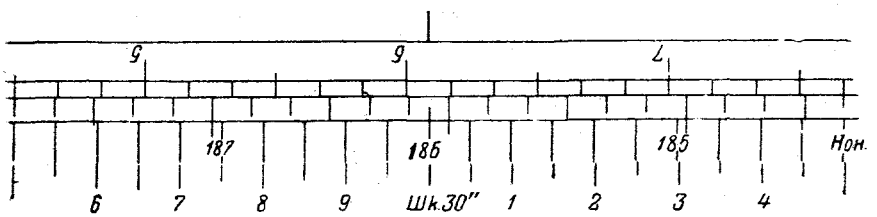


Рис. 8.

Рассмотрим теперь, как берутся отсчеты, когда $kt' = a > {}^1/_2 L'$ (на рисунках $kt' > 5'$). Из равенства (7) следует, что члены a или b принимают значения от 0 до L' при изменении k от 0 до $2n-1$. В обычных нониусах $k > n$ быть не может. В оптическом же нониусе деления могут быть распространены от нуля до n влево и вправо от индекса, а следовательно, k может принимать значения в промежутках от 0 до n вправо и от 0 до $-n$ влево, т. е. [illegible] n деления

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ ГЛАВНАЯ БИБЛИОТЕКА

слева и n справа от индекса. Выясним, когда K принимает значения от 0 до n и когда от n до $2n-1$.

Из равенства (3) имеем:

$$\begin{aligned} k<n &\text{ когда } a+б=kt'<nt'=L' \\ k=n &\quad „ \quad a+б=kt'=nt'=L' \\ k>n &\quad „ \quad a+б=kt'>nt'=L' \end{aligned}$$

Из написанных равенств следует: 1) если $a+б<L'$, то $k<n$ и отсчет в этом случае берется справа от индекса, 2) если $a+б=L'$, то $k=n$ и отсчет берется по крайнему правому штриху нониуса $\left(\text{номер штриха нониуса}=n, \text{ а шкалы } n-\frac{1}{2}\right)$. Заметим, что при $k=n$ будут совпадать не только правые крайние штрихи, но также и крайние левые, а потому отсчет a может быть взят в этом случае или по правому, или по левому крайнему штриху нониуса (на шкале номер крайнего левого и правого штрихов равен $n-\frac{1}{2}$). Такой случай изображен на рис. 8. И, наконец 3) если $a+б>L'$, то $k>n$ и будет лежать в промежутке: $n<k<2n-1$. Отсчеты в последнем случае берутся слева от индекса и возрастают от крайнего левого n-го деления нониуса к индексу.

Поясним это на примере, воспользовавшись рисунками 9, 10 . . . Совпадающему первому делению $\left(n-\frac{1}{2}\right)+1$ шкалы справа, считая от левого штриха нониуса, будет соответствовать отсчет 6°05′30″, второму 6°06′00″ и т. д.

$\left(n-\frac{1}{2}\right)+3$ соответствует отсчет 6°06′30″ (рис. 11)

$\left(n-\frac{1}{2}\right)+4$ „ „ 6°07′00″

. . . . . .

. . . . . .

$\left(n-\frac{1}{2}\right)+9$ „ „ 6°09′30″ (рис. 12)

Поясним теперь, как будутся отсчеты с точностью до половины расчетной.

Возвратимся опять к исходному положению, когда индекс совпадает с совмещенными изображениями противоположных делений лимба — 6° и 186° (рис. 4). Так как число n_1, определяемое из равенства (9), дробное, отличающееся от целого на половину единицы, то понятно, что в пределах оптического нониуса не будет ни слева, ни справа ни одного совпадающего деления нониуса. Если вращать алидаду с исходного положения в положительном направлении, то ближайшее совмещение штрихов получится слева от индекса от делений $\left(n-\frac{1}{2}\right)$ нониуса и $\left(n-1\right)-\frac{1}{2}$ лимба. Деления $\left(n-\frac{1}{2}\right)$ и $\left(n-1\right)-\frac{1}{2}$ соответствуют целым числам и имеются в пределах оптического нониуса.

Выясним, какой же будет отсчет a при совмещенных делениях $\left(n-\frac{1}{2}\right)$ и $\left(n-1\right)-\frac{1}{2}$.

Из формулы (6) имеем:

$$a=(a+б)\frac{n}{2n-1}.$$

Из рисунка 13 очевидно, что

$$a+б=\left\{(n-1)-\frac{1}{2}\right\}L'-\left(n-\frac{1}{2}\right)l'=\left(n-\frac{1}{2}\right)L'-L'-\left(n-\frac{1}{2}\right)l'$$

или

$$a+б=\left(n-\frac{1}{2}\right)(L'-l')-L'.$$

Но $L'-l'=t$ и $nt=L'$, поэтому $a+б=\left(n-\frac{1}{2}\right)t-nt=-\frac{1}{2}\cdot t$.

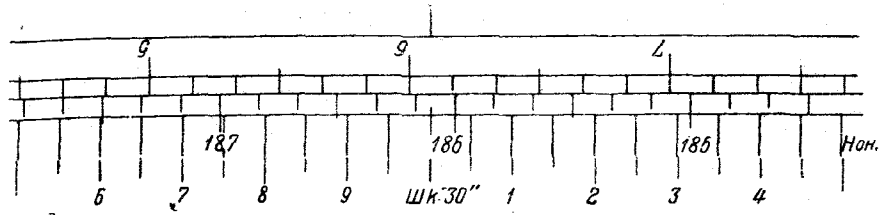


Рис. 9.

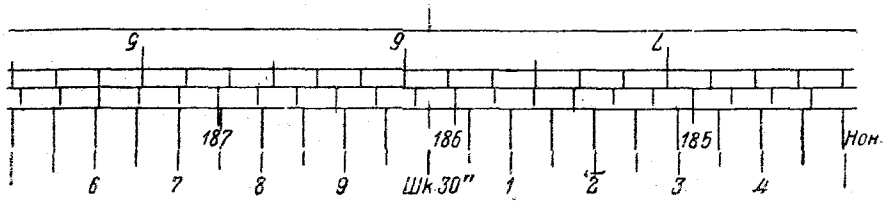


Рис. 10.

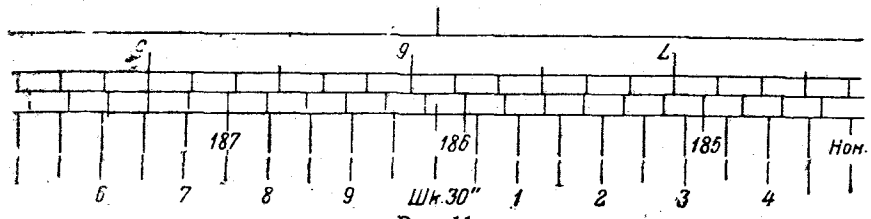


Рис. 11.

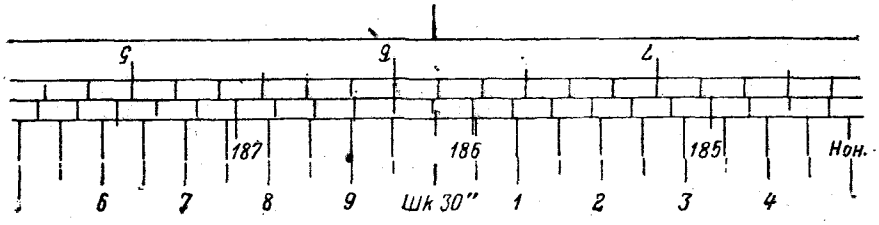


Рис. 12.

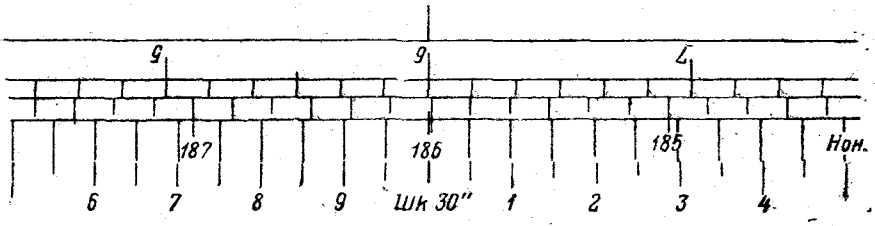


Рис. 13.

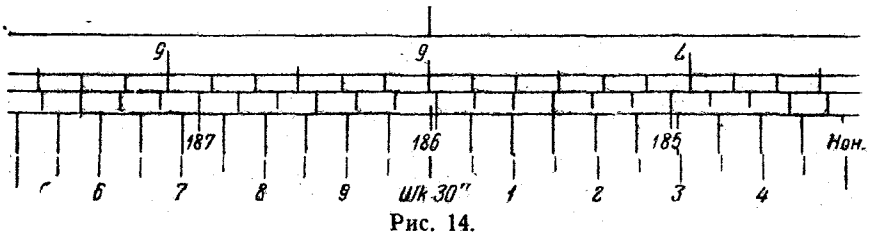


Рис. 14.

Подставив найденное значение $a+б$ в (6) и учтя, что n для левой стороны отрицательно, получим отсчет a равный:

$$a = -\frac{1}{2}\, t\, \frac{-n}{2n-1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{nt}{2n-1}$$

или $a = \frac{1}{2} \cdot \frac{L'}{2n-1}$.

Но $\frac{L'}{2n-1}$ мы приняли за расчетную точность оптического нониуса, поэтому

$$a = \frac{1}{2} t',$$

т. е. отсчет равен половине расчетной точности. Следующее совмещение слева от индекса произойдет от делений $\left(n-\frac{3}{2}\right)$ нониуса и $(n-1)-\frac{3}{2}$ лимба, которому будет соответствовать отсчет 6°00′45″ (рис. 14) и т. д., штрихи будут совмещаться через каждое последующее деление с возрастанием отсчетов на 30″, т. е. 6°01′15″, 6°01′45″ . . . 6°09′45″.

Взятие отсчетов с точностью до $^1/_2t'$ (15″) казалось бы должно внести путаницу в отсчитывание вообще. Однако это не так. Деления нониуса и лимба, которым соответствуют $^1/_2t'$ отсчеты, будут совмещаться не против штрихов шкалы, а посредине их. Поэтому отсчеты с точностью t' и $^1/_2t'$ берутся независимо друг от друга на разных, хорошо отличимых участках оптического нониуса.

Отсчитывание по оптическому нониусу производится в следующем порядке:

1. Берется отсчет по лимбу против индекса *ii* с точностью цены деления его.

2. Берется отсчет по оптическому нониусу: а) по шкале справа или слева от индекса с точностью t' и б) прибавляется к шкальному отсчету $^1/_2t'$, если какое либо, безразлично, деление нониуса совпадает с делением лимба в промежутке между штрихами шкалы.

Предельная точность обычного верньера у современных геодезических инструментов достигает, как уже упоминалось выше, до 10″. Предельная же точность оптического нониуса может быть получена в два раза больше. Если же брать отсчеты до $^1/_2t'$, то предельная точность нониуса увеличится еще в два раза и будет равна 2″,5.

Увеличение расчетной точности оптического нониуса в два раза в сравнении с обычным получается благодаря оптически призменной системе, при помощи которой угол вращения алидады фиксируется в плоскости изображения лимба в два раза больше.

Устройство оптического нониуса в теодолитах

Устройство оптического нониуса и конструктивное оформление теодолита с ним изображено на рис. 15, 16, 17 и 18. На рис. 15 дана оптическая схема теодолита универсала с оптическим нониусом для обоих кругов — горизонтального и вертикального. Нониус горизонтального круга осуществляется при помощи двух призм — *Пр. 1*, *Пр. 2*, двух объективов — *Об. 1*, *Об. 2* и бипризмы — *Бипр. 1*; вертикального круга при помощи призм — *Пр. I*, *Пр. II*, объективов — *Об. I*, *Об. II* и бипризмы — *Бипр. 2*. Эти оптические системы устанавливаются соответственно на алидадах горизонтального и вертикального кругов. Бипризма делается из двух склеенных призм — трехгранной прямоугольной, склеенная грань которой посеребрена до половины — участок *аб*, и ромбической. Край *б* слоя серебра образует резкую границу, разделяющую два изображения диаметрально противоположных делений лимба. Оба изображения делений лимба сводятся при помощи объективов *Об. 1*, *Об. 2*, (*Об. I*, *Об. II*) к одной общей плоскости, проходящей через линию раздела *б*. Это необходимо для того, чтобы изображения нониуса и линии *б* были одинаково отчетливо видны и не имели параллакс. Кроме того объективы дают изображениям диаметрально противоположных делений лимба разное увеличение, подчиненное условию построения нониуса с заданной точностью. Таким образом, оптическая система в целом дает в плоскости, проходящей через линию *б*, оптический нониус.

Полученные в плоскостях бипризм (*Бипр. 1* и *Бипр. 2*) нониусы фиксируются в плоскость шкалы — *шкала*, установленной в фокусе отсчетного окуляра — *Ок.* Для нониуса горизонтального круга это осуществляется при помощи *Об. 3* и *Пр. 4*, вертикального — при помощи трехгранной прямоугольной призмы, приклеенной к бипризме, объектива *Об. III*, призмы *Пр. IV* и призмы *Пр. 4*. Призма *Пр. 4* введена для изменения направления лучей из положения горизонтального в положение более удобное для отсчитывания, она отклоняет их на 60° вверх от начального направления. Назначение призмы *Пр. IV* понятно из чертежа, она

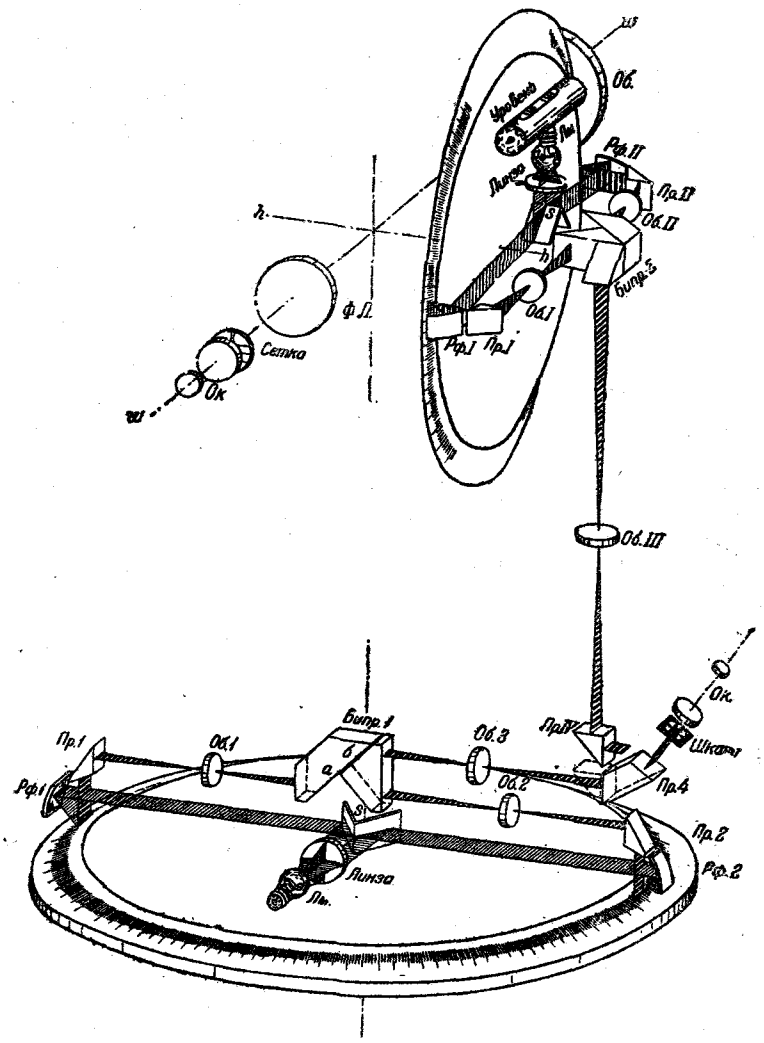


Рис. 15.

переключает шкалу на видимое изображение нониуса горизонтального или вертикального круга. Призма, изображенная на чертеже пунктиром, установлена на изображение нониуса вертикального круга. Таким образом, при помощи одного окуляра берутся отсчеты по горизонтальному и вертикальному лимбам.

Деления лимба горизонтального и вертикального кругов освещаются при помощи электрических лампочек *Лм.* Лампочка устанавливается так, чтобы светящийся волосок ее оказался в главном фокусе. Лучи света по выходе из лампочки пойдут параллельным потоком на зеркальца — *S* (или призмочки), установленные отражающими плоскостями под углом в 45° к диаметру лимба, и, отразившись от

них, разойдутся в противоположные стороны. Далее на своем пути они еще раз падают на отражатели *Рф. 1*, *Рф. 2* (*Рф. I*, *Рф. II*) с параболической матовой поверхностью и, отразившись от них, освещают деления лимба.

Освещение электрическое может быть заменено дневным, если работа производится на поверхности. Для этого лампочка с линзой вывинчивается и на их место ставится призмочка. При помощи призмочки лучам света дается направление на зеркальца.

На рис. 15 обозначены: *Об.* — объектив трубы, *Ф. Л.* — фокусирующая линза ее, *Сетка* — сетка нитей, *Ок.* — окуляр

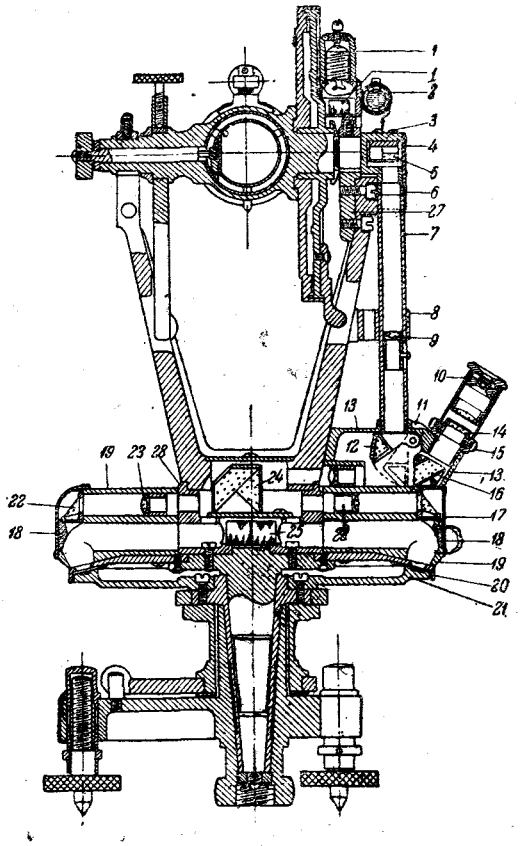


Рис. 16.

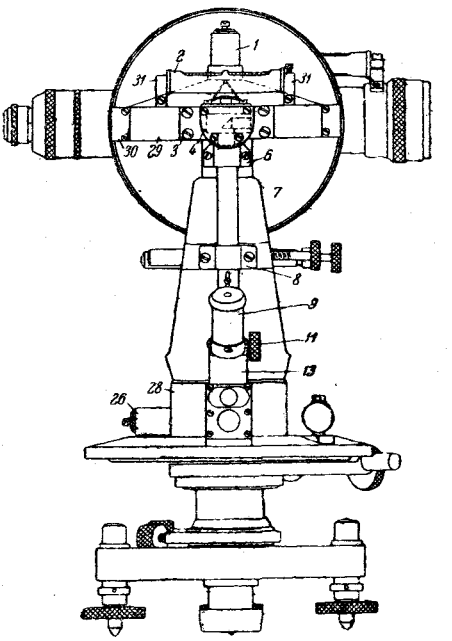


Рис. 17.

трубы, *vv* — основная ось инструмента, *hh* — ось вращения трубы и *ww* — визирная ось.

Конструктивное оформление теодолита с оптическим нониусом изображено на рис. 16, 17. Здесь показано конструктивное устройство оптического нониуса на повторительном универсальном теодолите. Не останавливаясь на теодолите как таковом, дадим описание конструкции оптического нониуса.

1. Патрон с электрической лампочкой для освещения делений лимба вертикального круга. Лучи света от лампочки падают на зеркальца (*1'*), отражаются от них и идут двумя потоками к диаметрально противоположным делениям лимба.

2. Уровень вертикального круга. Он прикрепляется своими подставками (*31*) к металлической оправе призм и линз оптического нониуса, привинченного к алидаде вертикального круга.

3. Оправа для закрепления бипризмы. Сочленение этой оправы с оправой, несущей внутри призмы, и линзы оптического нониуса вертикального круга показано на рисунках 16, 17.

4. Металлическая пластинка, прикрывающая бипризму.

5. Бипризма.

6. Верхний держатель цилиндрического тубуса (*7*). Привинчивается к подставке трубы.

7. Цилиндрический тубус. Через тубус передается изображение нониуса из бипризмы к отсчетному микроскопу.

8. Средний держатель тубуса. Привинчивается к подставке трубы.

9. Объектив, фиксирующий оптический нониус вертикального круга в плоскость сетки окуляра.

10. Окуляр для взятия отсчетов по оптическому нониусу горизонтального и вертикального кругов.

11. Кремальера для переключения призмы (12) на нониус горизонтального или вертикального круга.

12. Призма-переключатель. На чертеже призма изображена пунктиром в таком положении, когда окуляр включен на нониус вертикального круга, и сплошными линиями — горизонтального круга.

13. Держатель окуляра и тубуса (отсчетного микроскопа). Привинчивается к подставке трубы и оправе оптического нониуса горизонтального круга.

14. Стеклянная пластинка (шкала) с нанесенными на ней индексом и шкалами нониуса.

15. Исправительные винты для установки индекса в правильном положении.

16 Призмы для отклонения оси микроскопа на 60° вверх от первоначального направления.

17. Металлическая пластинка, прикрывающая призму оптического нониуса горизонтального круга.

18. Эллиптические отражатели из гипса. Отраженный свет — рассеянный.

19. Оправа призм и линз оптического нониуса горизонтального круга. Привинчивается к покрышке (кожуху) на алидаде горизонтального круга.

20. Покрышка (кожух) алидады и лимба горизонтального круга.

21. Лимб горизонтального круга.

22. Призмы оптического нониуса горизонтального круга.

23. Объективы его же.

24. Бипризма его же.

25. Зеркальца, направляющие свет на диаметрально противоположные деления лимба горизонтального круга.

26. Патрон с электрической лампочкой для освещения делений лимба горизонтального круга.

27. Металлическая пластинка с лагерами для оси трубы. Привинчивается к подставке трубы. Делается это в том случае, если оптический нониус монтируется на обычном повторительном теодолите.

28. Цилиндрическая подставка. Внутри ее устанавливаются бипризма и зеркальца. Она привинчивается к алидаде горизонтального круга, а на ней сверху устанавливается и привинчивается подставка трубы.

29. Оправа для призм и линз оптического нониуса вертикального круга.

30. Металлические пластинки для прикрытия призм.

31. Подставки уровня вертикального круга.

Приведенная конструкция оптического нониуса отличается своей простотой устройства, поэтому он может быть смонтирован не только на вновь изготовленном теодолите, но также на теодолитах прежнего выпуска.

Исследования оптического нониуса

Нам уже известно, что оптический нониус получается от двух изображений диаметрально противоположных делений лимба, фиксируемых при помощи двух объективов в одной общей плоскости, проходящей через край *б* посеребренного слоя в бипризме. Эти два изображения разделяются линией *б* по общей хорде двух пересекающихся дуг лимба, поэтому деления каждой в отдельности взятой стороны лимба между собою не равны. Выясним, как велика ошибка отсчитывания по оптическому нониусу от неравенства делений его.

Допустим, что в плоскости оптического нониуса дуги лимба развернуты в прямую линию, тогда изображения делений лимба будут между собой равны. Возьмем попарно согласованные отсчеты по нониусам с неравными и равными делениями и сравним их. Разность между этими отсчетами даст ошибку нониуса с неравными делениями. Напишем уравнения отсчетов по обоим нониусам. Для нониуса первого отсчет может быть получен из диференциального уравнения вида:

$$da = t' \cdot dx, \tag{1}$$

где x — номер совпадающего штриха. Но $t' = \frac{L'}{2n-1}$, поэтому имеем:

$$da = \frac{L'}{2n-1} \cdot dx. \tag{2}$$

Напишем уравнение (2) в линейной мере. Для этого L' выразим через радиус дуги лимба и номер x совпадающего штриха нониуса:

$$L = r \cdot \cos\{(n-1)L'\}\{\operatorname{tg} xL' - \operatorname{tg}(x-1)L'\}. \quad (3)$$

В уравнении (3) обозначены: L — линейная величина деления лимба, L' — деление лимба в градусной мере, n — число делений нониуса и r — радиус изображения дуги лимба. Подставим значение L из (3) в (2), получим:

$$da = \frac{r \cdot \cos\{(n-1)L'\}}{2n-1}\{\operatorname{tg} xL' - \operatorname{tg}(x-1)L'\}\,dx. \quad (4)$$

Отсчет по нониусу для любого совпадающего штриха будет равен определенному интегралу от da, т. е.

$$a = \frac{r \cdot \cos\{(n-1)L'\}}{2n-1} \cdot \int_0^k \{\operatorname{tg} xL' - \operatorname{tg}(x-1)L\}\,dx. \quad (5)$$

Интегрируем:

$$\int_0^k \operatorname{tg} xL \cdot dx = -\frac{1}{L}\left|\lg\cos xL\right|_0^k = -\frac{1}{L} \cdot \lg\cos kL.$$

$$\int_0^k \operatorname{tg}(x-1)L \cdot dx = -\frac{1}{L}\left|\lg\cos(x-1)L\right|_0^k = -\frac{1}{L}\{\lg\cos(k-1)L - \lg\cos L\}.$$

Подставим значения интегралов в (5), получим окончательно:

$$a = \frac{r \cdot \cos[(n-1)L]}{(2n-1)L} \cdot \{\lg\cos(n-1)L - \lg\cos L - \lg\cos kL\}. \quad (6)$$

Развернем lg cos-ов в ряд, ограничиваясь по малости углов членами второй степени:

$$\lg\cos(k-1)L = -\frac{1}{2}(k-1)^2L^2 = -\frac{1}{2}k^2L^2 + kL^2 - \frac{1}{2}L^2,$$

$$\lg\cos L = -\frac{1}{2}L^2,$$

$$\lg\cos kL = -\frac{1}{2}k^2L^2$$

и подставим их значения в формулу (6). Получим:

$$a = \frac{r \cdot \cos[(n-1)L']}{(2n-1)L} \cdot \left\{-\frac{1}{2}k^2L^2 + k^2L^2 - \frac{1}{2}L^2 + \frac{1}{2}L^2 + \frac{1}{2}k^2L^2\right\}$$

или

$$a = \frac{r \cdot k \cdot L \cdot \cos[(n-1)L]}{2n-1}. \quad (7)$$

Напишем теперь уравнение отсчета в линейной мере по нониусу с равными делениями:

$$a = \frac{k \cdot r \cdot L}{2n-1}, \quad (8)$$

где L — деления лимба в аналитической мере.

Вычтем уравнение (8) из (7), получим ошибку отсчета в линейной мере по нониусу с неравными делениями.

$$\Delta a = \frac{k \cdot r \cdot L}{2n-1}\{\cos[(n-1)L]-1\} = \frac{k \cdot r \cdot L}{1-2n} \cdot 2 \cdot \sin^2\left[\frac{(n-1)L}{2}\right]. \qquad (9)$$

Ошибка Δa в секундах будет равна:

$$\Delta a'' = \frac{k \cdot L''}{\frac{1}{2}-n} \cdot \sin^2\left\{\frac{(n-1)L}{2}\right\}. \qquad (10)$$

Из уравнения (10) следует, что Δa принимает минимальное значение, равное нулю при $k=0$, и максимальное при $k=n$, т. е.

$$\Delta a''_{\max} = \frac{n \cdot L}{\frac{1}{2}-n} \cdot \sin^2\left[\frac{(n-1)L}{2}\right]. \qquad (11)$$

Подсчитаем $\Delta a''_{\max}$ для вышеприведенного оптического нониуса, построенного по данным $L=10'$ и $n=10{,}5$. Имеем:

$$\Delta a''_{\max} = \frac{10{,}5 \cdot 10 \cdot 60 \cdot \sin^2 \frac{9{,}5 \cdot 10'}{2}}{\frac{1}{2}-10{,}5} = -630'' \cdot \sin^2 \cdot 47' \cdot 5,$$

т. е.

$$\Delta a''_{\max} = 0'',12.$$

Получилась ошибка $\Delta a''_{\max}$ практически ничтожно малая. Таким образом, мы приходим к заключению, что неравенство делений оптического нониуса, которое получается от сечения двух дуг лимба хордой (линией *б*), дает ошибку в отсчитывании, практически не ощутимую.

Выясним теперь, имеет ли влияние на отсчитывание по оптическому нониусу эксцентриситет алидады.

Отсчеты на оптическом нониусе берутся по диаметрально противоположным делениям лимба. Это равносильно взятию среднего отсчета из двух по диаметрально противоположным верньерам в обычном теодолите. Известно, что такой средний отсчет исключает ошибку эксцентриситета, если она имеется. Точно так же при взятии отсчета по оптическому нониусу противоположные деления лимба, образующие отсчет, взаимно исключают ошибку эксцентриситета алидады. Таким образом, и здесь оптический нониус имеет преимущество перед обычным верньером, шкаловым и штриховым микроскопом и микроскоп-микрометром, при пользовании которыми обязательно надо брать два отсчета, чтобы исключить ошибку эксцентриситета.

Заключение

Оптический нониус имеет простую оптическую схему, легко выполнимую на заводах геодезического инструментостроения, поэтому применение его в теодолитах не встретит затруднений. Теодолиты с оптическим нониусом найдут применение в геодезическом и особенно в маркшейдерском деле. Они дадут возможность повысить качество измерений, удобства и производственную эффективность по сравнению с другими теодоли ами, исключая оптические.

В маркшейдерском деле теодолиты с оптическим нониусом могут вполне заменить теодолиты заграничные и тем самым сократить их импорт.

Zusammenfassung

Der optische Nonius beruht auf dem Prinzip der Vereinigung in einer Ebene von zwei diametral entgegengesetzten, mittels eines optischen Systems verschiedenfach vergrösserten Teilungen des Teilkreises.

Der Vergrösserung v_1 and v_2 der Abbildung dieser Teilungen wird ein solcher Wert zugegeben, dass in des Abbildungsebene das Verhältnis des gswöhnlichen Nonius zutreffe, und zwar:

$$L(n-1)v_1 = Lnv_2,$$

wo L der Wert einer Teilung des Teilkreises ist.

Die Genaugikeit der Ablesungen eines optischen Nonius ist doppelt so gross im Vergleich mit einem üblichen Vernier. Der Exzentrizitätsfehler wird bei ihm von selbst aufgehoben, da in der Noniusbildung diametral entgegengesetzte Teilungen des Teilkreises in Spiel treten.

Ein mit einem optischen Nonius versehener Theodolit kann von mehr kompakter Form als ein gswöhnlicher Instrument ausgeführt werden und ist viel bequemer in der Handhabung, insbesondere für Vermessungsarbeiten unter Tage.