

ми параметрами. На их основе установлено, что: 1) в канале голографической памяти с постоянными параметрами вероятность ошибки $N_n(z_n)$ при парафазном кодировании приближенно равна половине квадрата вероятности появления в массиве данных «единицы» и «нуля» таких, что $P_1 < P_0$, или третьей степени исходной вероятности ошибки при избыточном кодировании ($N_n(z_n) \sim N^3(z)$); 2) в канале голографической памяти с флуктуирующими параметрами парафазный способ представления информации остается эффективным при достаточно низком исходном качестве голограмм (контраст $K = 10$, $(C/Ш)_1 = 3$, $(C/Ш)_0 = 2$) и абберациях пучков $\sigma_i < 0,15$. По сравнению с корректирующими кодами парафазный код позволяет снизить вероятность ошибки для таких голограмм на 3—5 порядков.

Таким образом, можно сделать вывод, что большая избыточность (50 %) парафазного способа кодирования в голографической памяти в полной мере компенсируется значительным повышением достоверности, а также снижением требований к аппаратуре фотосчитывания, системам автоустойровок и качеству голограмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Домбровский С. А. Оценка эффективности применения корректирующих кодов в голографических ЗУ // Автометрия.— 1989.— № 2.
2. Вербовецкий А. А., Федоров Б. В. Запись на фазовые голограммы информации в парафазном коде // Оптика и спектроскопия.— 1972.— 33, вып. 6.
3. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Достоверность считывания информации в ЗЗУ с постоянными параметрами при избыточном кодировании двоичных данных // Автометрия.— 1988.— № 6.
4. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений.— М.: Сов. радио, 1963.
5. Rice S. O. Mathematical analysis of random noise // Bell Syst. Techn. J.— 1944.— 23, N 3.— P. 282.
6. Блок А. А., Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Экспериментальные исследования достоверности считывания данных в голографических ЗУ // Автометрия.— 1984.— № 3.
7. Ванюшев Б. В., Волков А. В., Гибин И. С. и др. Устройство хранения и считывания данных в голографической системе архивной памяти // Там же.
8. Домбровский В. А., Домбровский С. А. Измерение статистических характеристик двухградационных изображений с помощью фотоматрицы // ОМП.— 1987.— № 12.
9. Домбровский С. А. Достоверность считывания в канале голографического ЗУ с флуктуирующими параметрами // Автометрия.— 1989.— № 1.

Поступила в редакцию 14 июля 1988 г.

УДК 681.327.68

В. С. СОБОЛЕВ, И. В. ФИЛИМОНЕНКО

(Новосибирск)

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТОПРИЕМНОГО ТРАКТА МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

Оптические дисковые накопители (ОДН) считаются одним из перспективных запоминающих устройств. Предполагается, что реверсивная магнитооптическая память явится преемником традиционных накопителей на жестких магнитных дисках и магнитных лентах. Способ магнитооптической записи [1] заключается в локальном воздействии лазерного излучения на пленку ферромагнитного материала в присутствии внеш-

него магнитного поля. Поглощенный импульс света выводит материал за точку Кюри или точку компенсации (благодаря либо тепловым, либо магнитострикционным эффектам), в результате чего пленка оказывается перемангнитенной. Считывание осуществляется ослабленным поляризованным излучением. Отраженный от пленки свет вследствие эффекта Керра претерпевает поворот плоскости поляризации на небольшой угол, который является носителем записанной информации.

Вследствие малости достигнутых в настоящее время углов поворота плоскости поляризации, ограничений по мощности считывающего излучения и требований высокой достоверности преобразования информации одна из главных проблем создания ОДН — повышение отношения сигнал/шум. Основными составляющими шума являются: дробовой, тепловой (темповой) и фоновый шум фотодетектора, шум лазера, электронного тракта усиления сигнала и носителя информации. Источники шума и пути его уменьшения рассмотрены в [2—5], однако вопросы оптимизации фотоприемного тракта в этом смысле освещены недостаточно. Данная статья посвящена анализу отношения сигнал/шум как функции угла поворота плоскости поляризации света, отраженного носителем информации в присутствии и отсутствие фонового шума. Особое внимание уделяется поиску оптимальных углов между направлением поляризации оптического сигнала и осью анализатора.

В идеализированном случае, когда можно ограничиться учетом только дробового шума, ток на выходе фотодетектора, расположенного после анализатора, и значение его среднеквадратичных отклонений имеют вид [2]

$$J = \frac{P_0 R \alpha e}{h\nu} \sin^2 \Theta; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{P_0 R \alpha e^2 2B}{h\nu}} \sin \Theta, \quad (2)$$

где P_0 — мощность светового потока, падающего на магнитооптическую пленку при воспроизведении; R — коэффициент отражения; α — квантовая эффективность фотокатода; e — заряд электрона; $h\nu$ — энергия кванта лазерного излучения; Θ — угол между плоскостью поляризации оптического сигнала и осью непропускания анализатора; B — ширина полосы частот электронного тракта.

При отражении от перпендикулярно намагнитенной поверхности диска линейно поляризованный свет испытывает поворот плоскости поляризации на угол керровского вращения $\Delta\Theta_k$, что ведет к изменению J на величину ΔJ , являющуюся полезным сигналом:

$$\Delta J = \frac{P_0 R \alpha e}{h\nu} [\sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k) - \sin^2 \Theta]. \quad (3)$$

Отношение сигнал/шум при этом имеет вид

$$\frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}}} = \sqrt{\frac{P_0 R \alpha}{h\nu 2B}} \frac{[\sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k) - \sin^2 \Theta]}{\sin(\Theta + \Delta\Theta_k)}. \quad (4)$$

Если угол $\Delta\Theta_k$ мал и $\Theta \gg \Delta\Theta_k$, то выражение (3) упрощается с помощью преобразования

$$\begin{aligned} \sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k) - \sin^2 \Theta &= \frac{1}{2} (1 - \cos 2(\Theta + \Delta\Theta_k) - 1 + \cos 2\Theta) = \\ &= \frac{1}{2} (-\cos 2\Theta \cos 2\Delta\Theta_k + \sin 2\Theta \sin 2\Delta\Theta_k + \cos 2\Theta) = \sin 2\Theta \Delta\Theta_k. \end{aligned} \quad (4')$$

Для ΔJ и $\sigma_{\text{ш}}$ получим

$$\Delta J = \frac{P_0 R \alpha e}{h\nu} \sin 2\Theta \Delta\Theta_k; \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{2P_0 R \alpha e^2 B}{h\nu}} \sin \Theta. \quad (6)$$

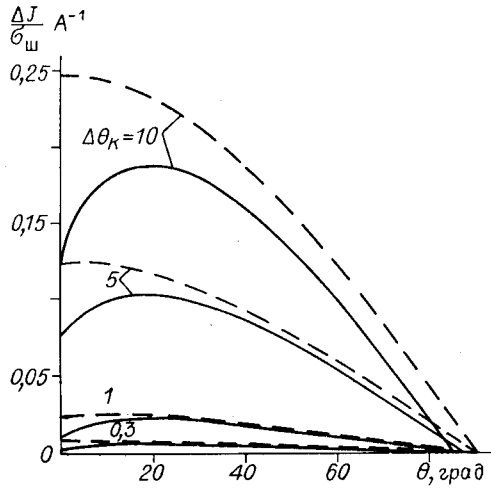


Рис. 1

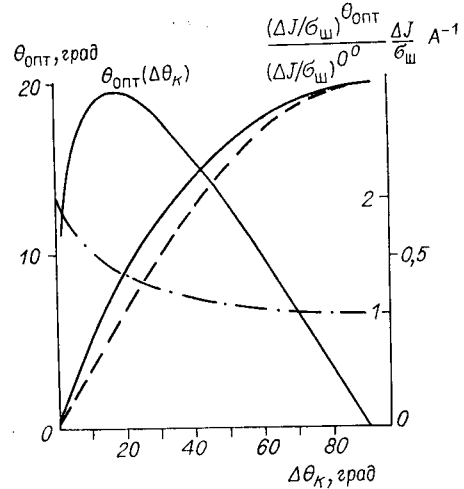


Рис. 2

В этом случае отношение сигнал/шум

$$\frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}}} = \sqrt{\frac{2P_0 R \alpha}{h \nu B}} \cos \Theta \Delta \Theta_k. \quad (7)$$

На рис. 1 представлены графики (4) и (7) для ряда значений $\Delta \Theta_k$. Из них можно определить область, в которой допустимо использование упрощенного выражения (7) (штриховые линии); при малых значениях Θ оно искажает даже ход функции $\Delta J / \sigma_{\text{ш}} = f(\Theta)$.

Истинная зависимость отношения сигнал/шум от Θ (4) (сплошные линии) носит немонотонный характер: каждому значению $\Delta \Theta_k$ соответствует определенный угол $\Theta = \Theta_{\text{опт}}$, при котором отношение сигнал/шум достигает максимума. Это объясняется различным характером функций $\Delta J = f(\Theta, \Delta \Theta_k)$ и $\sigma_{\text{ш}} = f(\Theta, \Delta \Theta_k)$.

Дифференцируя (4) по Θ и приравнявая производную нулю, найдем следующее уравнение, определяющее $\Theta_{\text{опт}}$:

$$\sin(3\Theta + 2\Delta\Theta) - 3 \sin \Theta = 0. \quad (8)$$

Зависимость $\Theta_{\text{опт}} = f(\Delta \Theta_k)$ была получена с помощью ЭВМ методом конечных разностей. На рис. 2 представлен ее график, позволяющий найти необходимый угол $\Theta_{\text{опт}}$ для заданных значений $\Delta \Theta_k$. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что для каждого ожидаемого угла керровского вращения $\Delta \Theta_k$ необходимо анализатор ориентировать под оптимальным углом по отношению к направлению поляризации отраженного света.

На рис. 2 изображены также график зависимости отношения сигнал/шум при выполнении условия $\Theta = \Theta_{\text{опт}}$ $\left. \frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}}} \right|_{\Theta = \Theta_{\text{опт}}} = f(\Delta \Theta_k)$ (сплош-

ная линия) и график $\left. \frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}}} \right|_{\Theta = 0} = f(\Delta \Theta_k)$ (штриховая линия), для которого угол $\Theta = 0$ при всех значениях $\Delta \Theta_k$. Расчет производился по формуле (4). Приведем типичные значения параметров, входящих в (4):

Мощность светового потока, падающего на МО-пленку (P_0)	$3 \cdot 10^{-3}$ Вт
Коэффициент отражения (R)	0,1
Квантовая эффективность фотокатода (α)	0,25
Ширина полосы частот канала (B)	$1,5 \cdot 10^6$ Гц

Из графиков видно, что введение смещения по Θ позволяет значительно (до 2 раз при малых $\Delta \Theta_k$) улучшить отношение сигнал/шум по

сравнению с $\Theta = 0$. Конкретные значения получаемого выигрыша $\frac{(\Delta J/\sigma_{\text{ш}})^{\Theta=45^\circ}}{(\Delta J/\sigma_{\text{ш}})^{\Theta=0^\circ}} = f(\Delta\Theta_k)$ показаны штрихпунктирной кривой.

Необходимо отметить тот факт, что значение отношения сигнал/шум резко возрастает с увеличением $\Delta\Theta_k$, поэтому основным путем увеличения $\Delta J/\sigma_{\text{ш}}$ является создание магнитооптических материалов с возможно большим углом керровского вращения $\Delta\Theta_k$. Используя данные, приведенные выше, в качестве примера рассчитаем отношение сигнал/шум по мощности для $\Delta\Theta_k = 0,3^\circ$ при $\Theta = \Theta_{\text{опт}} = 7,7^\circ$:

$$\frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}}} = 10 \lg \left[\frac{P_0 R \alpha}{h\nu 2B} \left(\frac{\sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k) - \sin^2 \Theta}{\sin(\Theta + \Delta\Theta_k)} \right)^2 \right];$$

$$\frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}}} = 40 \text{ дБ.}$$

Для $\Delta\Theta_k = 1^\circ$ $\Delta J/\sigma_{\text{ш}} = 50,3$ дБ.

Кроме дробового шума, на выходе фотоприемного модуля имеют место тепловые шумы приемника, шумы, обусловленные фоновой засветкой, и шумы входных усилителей. Эти шумы вносят значительный вклад в выходной ток приемника, и поэтому анализ их влияния на отношение сигнал/шум представляет наибольший интерес. Выражение (4) в присутствии некоррелированных с дробовым фоновых шумов со среднеквадратичным значением $\sigma_{\text{ф}}$ примет вид

$$\frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}\Sigma}} = \frac{\Delta J}{\sqrt{\sigma_{\text{др}}^2 + \sigma_{\text{ф}}^2}} = \frac{P_0 R \alpha \epsilon [\sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k) \sin^2 \Theta]}{h\nu \sqrt{\frac{P_0 R \alpha \epsilon^2 2B}{h\nu} \sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k) + \sigma_{\text{ф}}^2}}. \quad (9)$$

Для упрощения введем обозначения:

$$\frac{P_0 R \alpha \epsilon}{h\nu} = B'; \quad \sqrt{\frac{2P_0 R \alpha \epsilon^2 B}{h\nu}} = \sigma_{\text{др. max}}.$$

Тогда (9) запишется следующим образом:

$$\frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}\Sigma}} = \frac{B' [\sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k) - \sin^2 \Theta]}{\sqrt{\sigma_{\text{др. max}}^2 \sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k) + \sigma_{\text{ф}}^2}}, \quad (10)$$

или

$$\frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}\Sigma}} = \frac{(B'/\sigma_{\text{др. max}}) [\sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k) - \sin^2 \Theta]}{\sqrt{\sigma_{\text{ф}}^2/\sigma_{\text{др. max}}^2 + \sin^2(\Theta + \Delta\Theta_k)}}. \quad (11)$$

При $\Theta = 0$ и $\Delta\Theta_k$ таким, что $\sigma_{\text{ф}}^2/\sigma_{\text{др. max}}^2 \gg \sin^2 \Delta\Theta_k$, (11) примет вид

$$\frac{\Delta J}{\sigma_{\text{ш}\Sigma}} = \frac{(B'/\sigma_{\text{др. max}}) (\Delta\Theta_k)^2}{\sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{др. max}}}. \quad (11')$$

Численное значение $B'/\sigma_{\text{др. max}}$ для параметров, приведенных выше, равно

$$\frac{B'}{\sigma_{\text{др. max}}} = \sqrt{\frac{P_0 R \alpha}{h\nu 2B}} = A = 10^4.$$

На рис. 3 представлены графики, иллюстрирующие (11) при $\sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{др. max}} = 1, 5, 10$, $\Delta\Theta_k = 1^\circ$ (сплошные линии) и $\Delta\Theta_k = 3^\circ$ (штриховые линии). Из графиков видно, что и в этом случае для каждого $\Delta\Theta_k$ и $\sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{др. max}}$ существует угол $\Theta_{\text{опт}}$, при котором отношение сигнал/шум достигает максимума. На рис. 4 изображена полученная с помощью ЭВМ зависимость $\Theta_{\text{опт}} = f(\Delta\Theta_k)$ для различных значений $\sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{др. max}}$, из которой видно, что $\Theta_{\text{опт}}$ зависит от величины фонового шума. Начиная с некоторого значения $\sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{др. max}}$, кривые сливаются и $\Theta_{\text{опт}}$ асимптотически стремится к углам, близким к 45° , что также показано на рис. 5 в другой

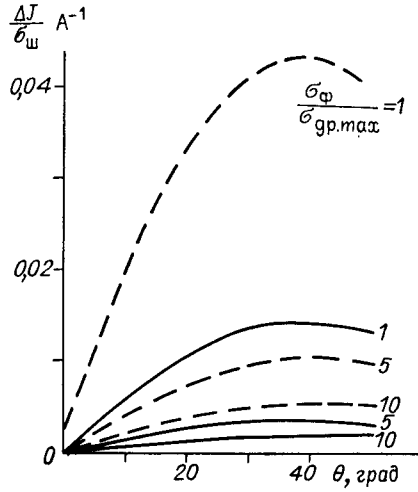


Рис. 3

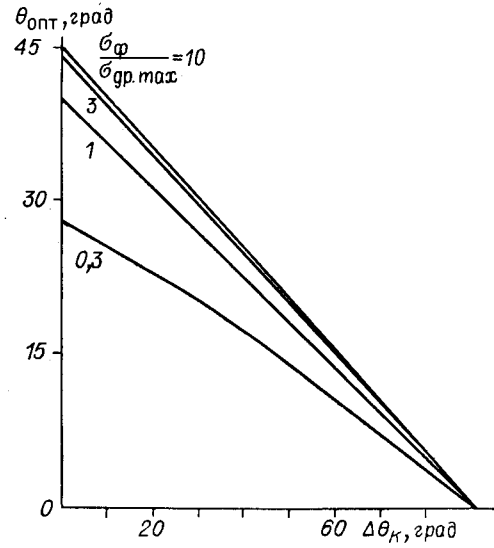


Рис. 4

системе координат. По формуле (11) был произведен расчет отношения сигнал/шум при выполнении условия $\Theta = \Theta_{\text{опт}}$ для различных $\Delta\Theta_k$. По полученным результатам построены графики на рис. 6 (сплошные линии). Штриховыми линиями изображена $\Delta J/\sigma_{\text{шз}} = f(\Delta\Theta_k)$ при $\Theta = 0$. Из рисунка видно, что введение угла Θ позволяет резко увеличить отношение сигнал/шум.

Влияние угла смещения Θ особенно заметно при малых $\Delta\Theta_k$. Пусть $\Theta = 0$. Тогда $\Delta J = A \sin^2 \Delta\Theta_k \simeq A \Delta\Theta_k^2$. Если же $\Theta \neq 0$ и $\Theta \gg \Delta\Theta_k$, то из (4') имеем $\Delta J \simeq A \sin 2\Theta \Delta\Theta_k$. В точке $\Theta = 45^\circ$ $\Delta J \simeq A \Delta\Theta_k$. Полученное возрастание сигнала равно $\frac{\Delta J^{45^\circ}}{\Delta J^{0^\circ}} = \frac{1}{\Delta\Theta_k}$ и при $\Delta\Theta_k = 0,3^\circ$ $\frac{\Delta J^{45^\circ}}{\Delta J^{0^\circ}} = 191$.

Численные значения выигрыша в отношении сигнал/шум для $\frac{\sigma_\phi}{\sigma_{\text{др.мах}}} = 3$ показаны на рис. 6 штрихпунктирной кривой $\frac{(\Delta J/\sigma_{\text{ш}})^{\Theta=\Theta_{\text{опт}}}}{(\Delta J/\sigma_{\text{ш}})^{\Theta=0}} = f(\Delta\Theta_k)$. Зная отношение $\sigma_\phi/\sigma_{\text{др.мах}}$, можно определить такую ориен-

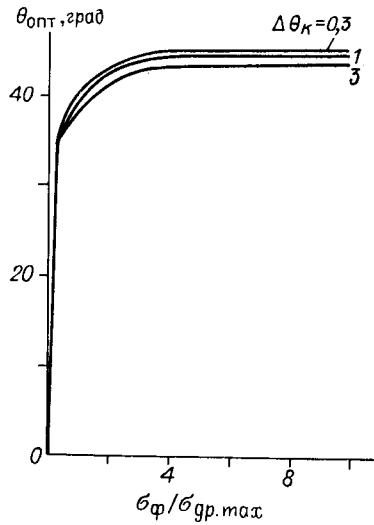


Рис. 5

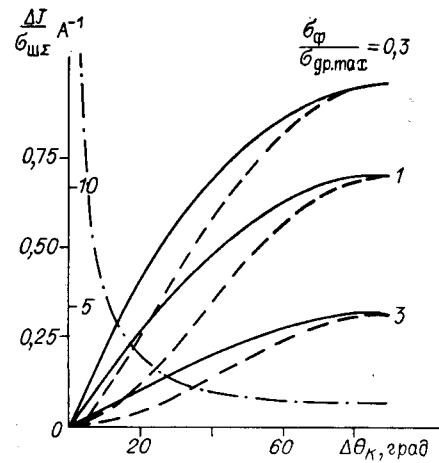


Рис. 6

тацию анализатора относительно плоскости поляризации света, при которой $\Delta J/\sigma_{ш}$ имеет максимальное значение.

Наряду с дробовым и фоновым шумами, в сигнале фотоприемника присутствуют шумы, обусловленные флуктуациями интенсивности излучения лазера и шероховатостью информационного слоя и покрытий диска. Устранить или значительно ослабить эти компоненты позволит дифференциальный фотоприемник. Принцип его работы состоит в том, что отраженный пучок расщепляется на два, каждый из которых направляется на свой фотоприемник, причем выходы приемников включены по дифференциальной схеме. Синфазные компоненты шума при этом взаимно ослабляются, а полезные компоненты сигнала суммируются. Если в качестве анализатора использовать поляризационный расщепитель, то легко реализовать дифференциальный приемник [1, 3] с равными интенсивностями на каждом фотодиоде (для поляризации, соответствующей зондирующему пучку света). Выражение для тока на выходе такого приемника имеет вид

$$J = J_1 - J_2 = \frac{P_0 R \alpha \epsilon}{h\nu} (\sin^2 \Theta - \cos^2 \Theta) = -\frac{P_0 R \alpha \epsilon}{h\nu} \cos 2\Theta. \quad (12)$$

В большинстве случаев интенсивности фоновых засветок сравнимы с интенсивностью отраженного от диска света или превышают ее. Как следует из предыдущего анализа (см. рис. 4), оптимальный угол Θ в таких условиях близок 45° .

Выходной сигнал идеального дифференциального фотоприемника в этом случае, равный разности токов фотодетекторов, описывается выражением

$$\Delta J = \frac{P_0 R \alpha \epsilon}{h\nu} [\sin^2(45 + \Delta\Theta_k) - \sin^2(45 - \Delta\Theta_k)] = \frac{P_0 R \alpha \epsilon}{h\nu} \sin^2 \Delta\Theta_k. \quad (13)$$

Среднеквадратичное отклонение суммарного дробового и фонового шумов фотодиодов запишется следующим образом:

$$\sigma_{ш\Sigma} = \sqrt{\sigma_{др1}^2 + \sigma_{др2}^2 + \sigma_{\Phi1}^2 + \sigma_{\Phi2}^2} = \sqrt{\frac{RP_0 \alpha \epsilon^2 2B}{h\nu} + 2\sigma_{\Phi}^2}, \quad (14)$$

так как

$$\sigma_{др1} = \sqrt{\frac{P_0 R \alpha \epsilon^2 2B}{h\nu} \sin^2(45 + \Delta\Theta_k)}, \quad \sigma_{др2} = \sqrt{\frac{P_0 R \alpha \epsilon^2 2B}{h\nu} \sin^2(45 - \Delta\Theta_k)}.$$

Выражение для отношения сигнал/шум равно

$$\frac{\Delta J}{\sigma_{ш\Sigma}} = \frac{P_0 R \alpha \epsilon \sin 2\Delta\Theta_k}{h\nu \sqrt{\frac{P_0 R \alpha \epsilon^2 2B}{h\nu} + 2\sigma_{\Phi}^2}} = \frac{A \sin 2\Delta\Theta_k}{\sqrt{1 + 2\sigma_{\Phi}^2/\sigma_{др.макс}^2}} \approx \frac{A 2\Delta\Theta_k}{\sqrt{1 + 2\frac{\sigma_{\Phi}^2}{\sigma_{др.макс}^2}}}. \quad (15)$$

Из (15) следует, что в отличие от одноканального приемника с $\Theta = 0$ (11') отношение сигнал/шум дифференциального приемника линейно зависит от $\Delta\Theta_k$. Если, например, $\Delta\Theta_k = 0,3^\circ$ и $\sigma_{\Phi}^2/\sigma_{др.макс}^2 \gg 1$, то выигрыш в отношении сигнал/шум для дифференциального приемника составит

$$\frac{(\Delta J/\sigma_{ш\Sigma})_{диф.пр}}{(\Delta J/\sigma_{ш\Sigma})_{ндиф.пр}} = 270 \text{ раз.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Майклдзон У. М. Магнитооптическая запись // ТИИЭР.— 1986.— 74, № 11.
2. Treves D. Magneto-optic of high-density recordings // J. Appl. Phys.— 1967.— 38, N 3.— P. 1192.
3. Kryder M. H. Magneto-optic recording technology // Ibid.— 1985.— 57, N 1.— P. 3913.
4. Зарубежная электронная техника: Сб. обзоров.— М., 1987.— № 9(316).
5. Masahiro Ojima, Atsushi Saito e. a. Compact magneto-optical disk for coded data storage // Appl. Opt.— 1986.— 25, N 4.— P. 483.

Поступила в редакцию 23 марта 1988 г.