

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Ордена Трудового Красного Знамени
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Препринт № 29



ИРФИ

К.Г.Иванова, Е.Ф.Орлов, И.С.Раков, Г.А.Шаронов

**КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА
ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРОЦЕССОВ (ДО 1,5 Мгц)
С ОТНОСИТЕЛЬНЫМ СМЕЩЕНИЕМ
ПО ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЕ**

г.Горький,
1972

А н н о т а ц и я

Рассмотрен метод оптической обработки сигналов в некогерентном свете при измерении корреляции сигналов с базой 10^8 в полосе частот до 1,5 мгц, имеющих априори неизвестные сдвиги во времени и по частоте.

Для проведения радиоастрономических измерений с высоким угловым разрешением и, в частности, в интерферометрии с независимыми гетеродинами [1] для обеспечения необходимой чувствительности приемной системы возникает задача измерения взаимной корреляции процессов, имеющих базу (произведение ширины полосы на длительность сигнала) $10^8 - 10^9$ в полосе до нескольких мегагерц. В настоящее время реализованы системы измерения корреляции с использованием ЭВМ и с предварительной записью сигналов на видеомагнитофон в полосе до 0,5 мГц. Расширение полосы с целью повышения чувствительности интерферометра существенно усложняет систему регистрации сигналов с требуемой точностью [2]. В связи с этим представляет интерес рассмотрение возможностей оптических систем обработки информации [3], которые качественно отличаются от электрических аналоговых и цифровых вычислительных систем. Основным преимуществом оптических систем является то, что элементарной операцией, выполняемой оптическими системами является операция измерения интеграла от произведения двух функций, задаваемых изменением прозрачности двумерных транспарантов. Вследствие двумерности оптических устройств число значений функций, над которыми выполняются операции, достигает $10^5 + 10^6$. Причем ввод всех значений функций в устройство обработки происходит одновременно и

практически мгновенно. Преимуществом также является относительная простота как используемых систем оптической записи сигналов на транспарант (фотопленку), так и оптико-механических систем корреляционной обработки.

В данной работе рассмотрен принцип действия оптических модуляционных систем корреляционной обработки, функционирующих в некогерентном свете в приближении геометрической оптики, применительно к широкополосным сигналам, имеющим относительный сдвиг как по времени, так и по частоте. Рассмотрены факторы, ограничивающие величину базы сигналов в таких системах.

1. Основные соотношения

Предположим, что сигналы на выходах антенн интерферометра представляют собой узкополосный случайный процесс и могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}
 u_1(t) &= a_0(t) \sin[\omega_0 t + \varphi(t)] + z_1'(t), \\
 u_2(t) &= a(t - \tau_{np}) \sin[\omega_0(t - \tau_{np}) + \varphi(t - \tau_{np})] + z_2'(t),
 \end{aligned} \quad (1)$$

где $a_0(t)$ и $\varphi(t)$ — медленные по сравнению с $1/\omega$ изменения амплитуды и фазы, $z_1(t)$ и $z_2(t)$ — аддитивный шум приемных устройств, $\tau_{np} = \frac{D}{c} \sin \theta_0$ — временная задержка сигнала, обусловленная пространственной разностью хода (D — длина базы интерферометра), θ_0 — угловое положение источника, отсчитываемое от нормали к базе.

ваемое от нормали к базовой линии интерферометра,
 c - скорость распространения волны.

После гетеродинирования сигналы регистрируются при помощи некоторой системы памяти в виде

$$\begin{aligned}
 U_1(t) &= a(t + \tau_0) \cos[(\omega_0 - \omega_1)(t + \tau_0) + \varphi(t + \tau_0) + \psi_1] + Z_1(t + \tau_0), \\
 U_2(t) &= a(t - \tau_{np}) \cos[(\omega_0 - \omega_2)(t - \tau_{np}) + \varphi(t - \tau_{np}) + \psi_2] + Z_2(t),
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где τ_0 - неточность совмещения записей во времени, ψ_1 и ψ_2 - случайные фазы гетеродинных сигналов, ω_1 , ω_2 - частоты гетеродинов.

Сигналы $v_1(t)$ и $v_2(t)$ представляют собой шумовые сигналы, сдвинутые по частоте из-за различия в частотах гетеродинов и наличия частоты интерференционной картины, связанной с изменением τ_{np} от времени при вращении Земли на величину

$$\omega = \omega_1 - \omega_2 + \omega_0 \frac{d\tau_{np}}{dt}$$

и по времени на величину

$\tau = \tau_{np} + \tau_0$. Для того, чтобы выделить сигнал на выходе интерферометра с автономным приемом необходимо выполнить следующую математическую операцию [2]

$$\begin{aligned}
 B_{1,2}(\tau', \Omega) &= \langle v_1(t) v_2(t + \tau') \rangle = \\
 &= \left\{ \langle \langle v_1(t) v_2(t + \tau') \rangle_{\tau_1} \cos(\omega + \Omega)t \rangle_{\tau}^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \langle \langle v_1(t) v_2(t + \tau') \rangle_{\tau_1} \sin(\omega + \Omega)t \rangle_{\tau}^2 \right\}^{1/2},
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где первое усреднение за время T_1 выполняется с целью уменьшения объема информации, по которой должен производиться Фурье анализ, T - полное время наблюдения. Величина ω выбирается исходя из априорных сведений о разностной частоте гетеродинов и частоте интерференции. Время предварительного усреднения T_1 выбирается из условия $T_1 \ll 2\pi/\omega$. При этом необходимо разрешение по частоте $\delta\Omega \sim 2\pi/T$ и по задержке $\delta T < 2\pi/\omega$. В этом случае при полосе частот $\Delta\omega$ принимаемого сигнала $2\pi \cdot 10^6 + 10^7$ необходим спектральный анализ в полосе $\Delta\Omega \approx 10^{-4} + 10^{-6}$, т.е. $\delta\Omega \approx 2\pi \cdot (1 + 10^2)$.

Вследствие наличия сдвига как по частоте, так и по времени имеют место два существенно различных по скорости временных процесса. Это приводит к соответствующему корреляционному анализу высокочастотных сигналов и Фурье-анализу низкочастотных компонент. Поэтому можно использовать двухступенчатое усреднение за время T_1 и T . Для $\Delta\omega = 2\pi \cdot 10^6$, $T = 10^2$ сек, $\omega = 2\pi \cdot 10^2$ интервал первичного усреднения составит $T_1 \ll 10^{-2}$ сек, вторичного $T \sim 10^2$ сек. Выражение (3), описывающее выполняемую операцию над сигналом, можно представить без второго усреднения по времени в виде

$$B_{1,2}(t, t') = \int_t^{t+T_1} a(t+\tau_0) a(t-\tau_{np}+\tau') \cos[(\omega_0 - \omega_1)(t+\tau_0) + \varphi(t+\tau_0) + \psi_1] \times \\ \times \cos[(\omega_0 - \omega_2)(t-\tau_{np}+\tau') + \varphi(t-\tau_{np}+\tau')] + \int_t^{t+T_1} z_1(t+\tau_0) z_2(t+\tau') dt.$$

Здесь предполагается, что $v(t)$ и $z(t)$ статистически независимы. Выполняя частичное интегрирование за $T_1 \ll 2\pi/\omega$, получим

$$B_{1,2}(t, \tau') = A(t) \sin C \left\{ \frac{\Delta\omega T_1}{2} (\tau_{np} + \tau_0 - \tau') \right\} \times \quad (5)$$

$$\times \cos [(\omega_1 - \omega_2)t + \omega_0 (\tau_{np} + \tau_0 - \tau') + \psi_2 - \psi_1] + Z(t).$$

где

$$A(t) = \int_t^{t+T_1} a(t+\tau_0) a(t-\tau_{np}-\tau') \cos[\varphi(t+\tau_0) - \varphi(t-\tau_{np}-\tau')] dt$$

$$Z(t) = \int_t^{t+T_1} z_1(t+\tau_0) z_2(t+\tau') dt.$$

Для достаточно больших $\Delta\omega T_1$ функцию $\sin C \left\{ \frac{\Delta\omega T_1}{2} (\tau_{np} + \tau_0 - \tau') \right\}$ можно заменить $\delta(\tau_{np} + \tau_0 - \tau')$

Вторая ступень обработки в виде Фурье-анализа полученной медленно меняющейся функции времени $B_{1,2}(t, \tau')$ может быть представлена в виде

$$B_{1,2}(\tau^*, \Omega) = \int_0^{\tau} \int_0^{\tau_{max}} B_{1,2}(t, \tau') \delta(\tau^* - \tau') \cos[(\omega + \Omega)t + \psi'] dt d\tau' \quad (6)$$

для некоторой полосы частот $\Delta\Omega$ и всех возможных значений ψ' , что эквивалентно обработке (3).

Функция $B_{1,2}(\tau^*, \Omega)$ представляет собой выход интерферометра с автономным приемом, причем под

Выходом понимается максимальное значение этой функции. Дальнейшая обработка зависит от задач, выполняемых интерферометром и описана, например, в [4].

2. Метод оптической корреляционной обработки

Оптический метод измерения взаимной корреляции сигналов при выборке объемов $\sim 10^8$ точек заключается в следующем. Исходные временные сигналы регистрируются двумя идентичными устройствами построчно в плотностном виде на движущуюся в продольном направлении фотопленку. При записи безусловно должны быть приняты меры по синхронизации строчной развертки от местного стабильного эталона частоты и синхронизации начала записи, чтобы возможная ошибка начала отсчета записи τ_0 была много меньше длительности записи одной строки $T_{стр}$. Величина $T_{стр}$ зависит от ширины полосы регистрируемого сигнала и числа точек на строке

$(N_{стр}) T_{стр} = \frac{2\pi}{\Delta\omega} \cdot N_{стр}$. Полученные таким образом двумерные растровые изображения сигналов на фотопленках используются затем при обработке для измерения скользящей функции взаимной корреляции с усреднением за время T_1 , которое соответствует выборке с числом точек $\sim 10^5$, при помощи оптического коррелометра с использованием некогерентного света [5].

Результаты измерения функции взаимной корреляции $B_{1,2}(t, \tau')$ регистрируются вторично на транспарант в виде плотностной растровой записи, которая в

свою очередь подвергается спектральной обработке по формуле (8).

Рассмотрим подробнее каждый из этапов оптической обработки. Корреляционная обработка двумерных растровых записей заключается в измерении светового потока, прошедшего последовательно через записи сигналов. Пространственный сдвиг одного изображения сигнала относительно другого эквивалентен временной задержке τ' . Оптическая схема измерений приведена на рис. 1. При сканировании величины τ' получается одна строка выходной растровой записи с усреднением по времени T_1 +). При этом каждая строка записи содержит $\sim 10^2$ значений задержек τ' и является усреднением примерно $300 \times 300 \approx 10^5$ точек входного сигнала. Остальные строки регистрируются при продольном одновременном движении оброек транспарантов. При общем объеме выборки $\sim 10^8$ выходная запись будет содержать $\sim 10^3$ строк по $\sim 10^2$ элементов в строке.

Вторичная обработка полученной функции $B_{1,2}(t, \tau')$ может быть осуществлена при помощи устройства типа ОСА-2 [3]. Схема такого устройства изображена на рис. 2. Существенным отличием этой схемы от описанного в [3] устройства являются наличие диафрагмы [3], которая должна соответствовать закону

+) При такой обработке часть мощности сигнала может быть потеряна. Максимальные потери определяются отношением $\{\tau_{\max} / \tau_{\text{стр}}\}^{1/2}$. Если $\tau_{\max} = 0,1 \tau_{\text{стр}}$, то потери составят $\sim 3\%$, что вполне допустимо.

изменения пространственной задержки $\tau_{np}(t)$. В достаточно хорошем приближении этот закон представляет прямую линию (при полном времени $T \approx 10^2$ сек). Поскольку параметры закона изменения $\tau_{np}(t)$ неизвестны (а именно сдвиг и угол наклона), необходим поиск по этим параметрам.

Результаты обработки могут быть представлены в цифровой форме. Необходимо заметить, что здесь рассмотрена обработка сигналов полностью оптическая, хотя возможны варианты объединения оптической обработки и при помощи ЭВМ, например, первичное усреднение выполняется оптической системой, а вторичная обработка уменьшенного количества информации - ЭВМ.

3. Результаты экспериментальной проверки метода

Экспериментальное исследование возможностей оптического модуляционного метода измерения взаимной корреляции широкополосных сигналов с большим объемом выборки было проведено предварительно на моделях с сохранением величины базы. Моделирование сигналов на выходах антенн интерферометра с автономным приемом осуществлялось при помощи гетеродинамирования высокочастотного узкополосного процесса, задаваемого генератором шума, в двух каналах с независимыми кварцевыми гетеродинами, имеющими небольшую расстройку по частоте. Естественно, поскольку отсутствует переменная пространственная задержка, сдвиг по времени двух сигналов оставался постоянным для всего наблюдения. Полу-

ченные таким образом два электрических сигнала регистрировались на фотопленку независимыми оптическими системами (Фототелеграфные аппараты), которые были синхронизованы стабильным эталонной частоты. Образец записи шумовых сигналов приведен на рис. 3(а). На фотопленке регистрируется $\sim 10^6$ бит информации. Двумерная автокорреляционная функция такого изображения сигнала представлена на рис. 3(б), а сечение ее на рис. 3(в). Отклик двумерной корреляционной функции показывает интервалы корреляции сигнала по обеим координатам. Рис.4 иллюстрирует результат перемножения двух записей, полученных на автономных системах записи сигналов. Горизонтальные полосы представляют собой низкочастотную компоненту корреляционной функции, связанную с наличием сдвига сигналов по частоте. При этом относительный сдвиг по частоте составлял $6 \cdot 10^{-6}$ (а) и $3 \cdot 10^{-5}$ (б) от полосы регистрируемых частот сигнала. Изображение на рис. 4 дает медленную зависимость корреляционной функции без сжатия строки. Результаты обработки второй ступени представлены на рис.5 (а и б) в виде графиков спектра пространственных частот транспарантов, приведенных на рис.4 (а и б) соответственно. Экспериментальная проверка оптического метода измерений взаимной корреляции с использованием растровой записи при помощи устройств, базирующихся на стандартных фототелеграфных аппаратах (типа ФТАП-Нева) показали реальную возможность применения оптического метода обработки больших массивов информа-

ции ($\sim 10^6$ точек в одном кадре). Рассматриваемая оптическая схема позволила осуществлять сканирование по величине задержки и значениям частотного сдвига в достаточно широких пределах. Модельные эксперименты показали, что используемая растровая запись получаемая механическими системами разверток пишущего луча, позволяет обеспечить необходимую идентичность двух систем растровой записи.

Для обработки широкополосных сигналов в полосе до 3 мГц была собрана достаточно простая система записи на движущуюся пленку с использованием электронной развертки по строкам.

На рис. 6 приведен отрезок изображения произведения двух транспарантов, полученных на системе с электронной разверткой по строкам и механическим перемещением пленки. На этом рисунке видна оспливающая продольная полоса, связанная с наличием сдвига по частоте. На рис. 7 показан результат второй обработки. Получение двух идентичных растров, обеспечивающих накопление сигнала по всей поверхности растра, ограничивается в первую очередь нелинейностями развертывающих устройств. Получение высокой степени линейности ($\sim 10^{-3}$) при регистрации широкополосных сигналов представляет собой сложную техническую задачу. В ходе исследования возможностей оптических систем с растровой записью был разработан метод измерения малых нелинейных искажений при помощи муаровых картин, который, в частности, был опробован на проверке качества телевизионных изображений, что представляет собой самостоятельную проблему. Проверка

влияния нелинейностей в рассматриваемой системе показала, что интервал корреляции регистрируемых сигналов (это видно из рис.6), обусловленный нелинейностями строчной электронной развертки, существенно меньше интервала продольной корреляции, связанной с нелинейностями механической системы перемещения пленки. В результате сужения области корреляции сигналов ограничивается ширина полосы и, следовательно, общий объем выборки. В данном случае эта полоса составляла $\sim 1,5$ мгц. Поскольку в данной схеме использовались стандартные развертывающие устройства с нелинейностью $\sim 5\%$, появляется возможность расширения полосы обрабатываемых сигналов за счет повышения качества развертывающих устройств.

Таким образом, проведенная экспериментальная проверка показала принципиальную возможность измерения корреляции двух широкополосных процессов ($\sim 1,5$ мгц) оптическими модуляционными (некогерентными) методами. В дальнейшей работе по улучшению качества растровых записей можно ожидать, что оптические методы превзойдут известные методы обработки при помощи ЭВМ как по объему обрабатываемой информации, так и по скорости ее обработки.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л.И.Матвиенко, Н.С.Кардашев, Г.Б.Шоломицкий
Изв.высш.уч.зав. - Радиофизика, 8, № 4, 651
(1965).
2. В.А.Алексеев, Э.Д.Гатэлюк, В.Д.Кротиков, В.Н.Ни-
конов, В.С.Троицкий, А.И.Чикин, Изв.высш.уч.зав.
Радиофизика, 13, № 1, 6 (1970).
3. В.А.Зверев, Е.Ф.Орлов, Оптические анализаторы,
Сов.радио, М., 1971.
4. В.А.Алексеев, Изв.высш.уч.зав. - Радиофизика,
12 № 4, 491 (1969).
5. В.А.Зверев, Е.Ф.Орлов, ПТЭ, № 1, 50 (1960).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1. Оптическая схема, используемая для измерения корреляции.
- Рис. 2. Оптическая схема вторичной обработки записей корреляционных функций.
1 - источник некогерентного света,
2,6 - линзы,
3 - оптические решетки, образующие синусоидальный растр,
4 - диффрагма,
5 - транспарант,
7 - фотоэлемент.
- Рис. 3. а - Образец записи шумового сигнала,
б - Двумерная автокорреляционная функция шумового сигнала,
в - Сечение автокорреляционной функции при $\tau_2 = 0$.
- Рис. 4. Результат перемножения записей двух шумовых сигналов с разными сдвигами по частоте
а - $\Omega = 6 \cdot 10^{-6} \Delta\omega$
б - $\Omega = 3 \cdot 10^{-5} \Delta\omega$
- Рис. 5. Результат вторичной обработки записей вида рис. 4 а,б.
- Рис. 6. Результат перемножений транспарантов с записями шумовых сигналов со сдвигом по частоте 130 гц в полосе до 1,5 мГц.
- Рис. 7. Результат вторичной обработки транспарантов вида рис.6.

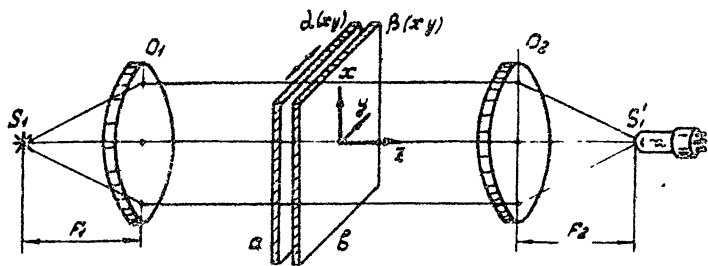


Рис. 1

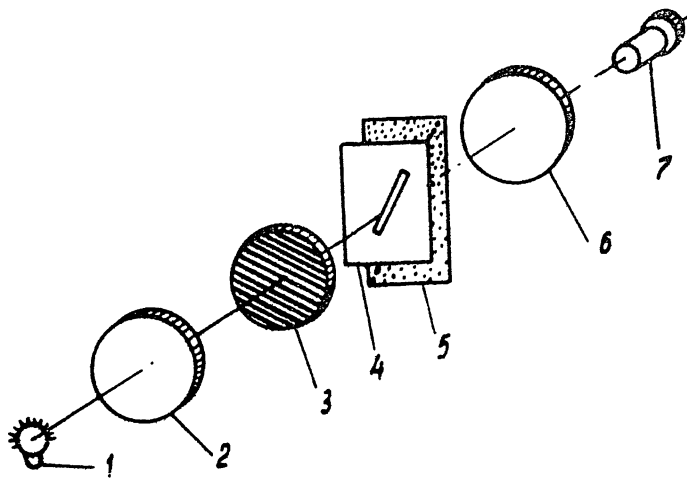
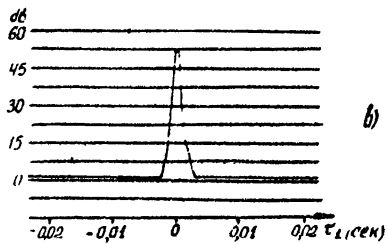
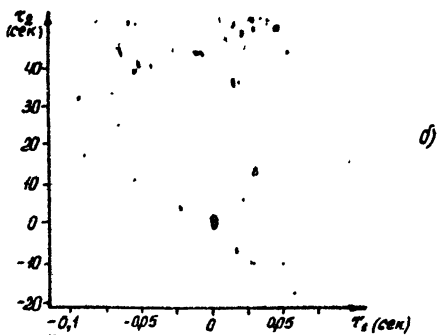
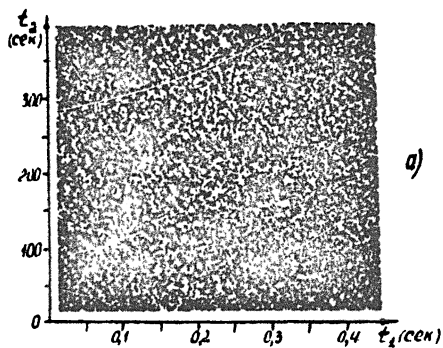
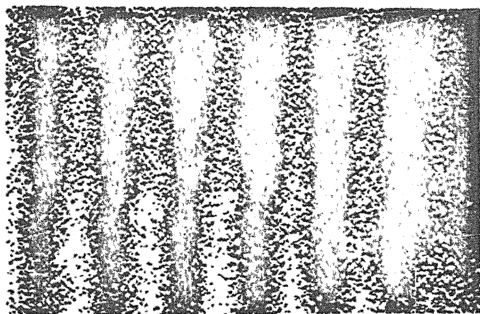


Рис. 2



а/



б/

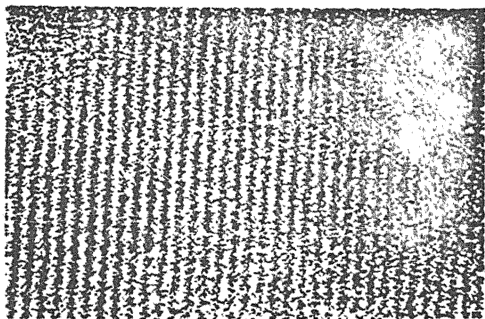


Рис 4

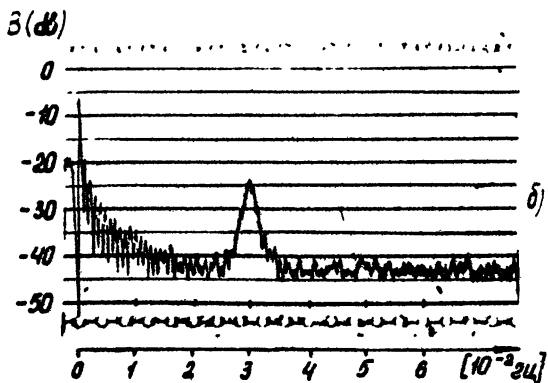
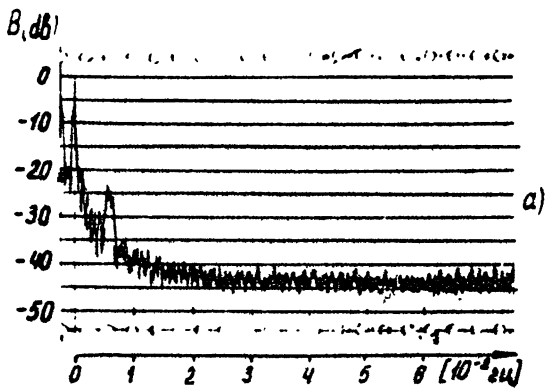




Рис. 6

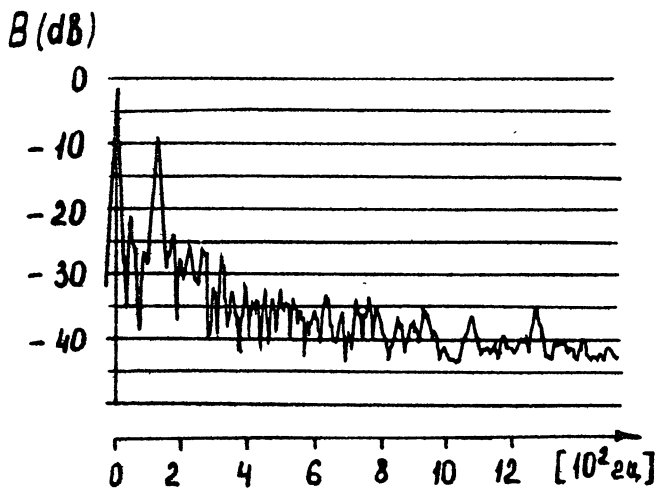


Рис. 7