

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ В АКУСТООПТИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ СПЕКТРА

д.т.н., проф. А.И. Стрелков, к.ф.-м.н. А.А. Можаяев, В.В.Марченко

Проанализирована возможность повышения разрешения по частоте двух одновременных радиоимпульсов большой длительности. Предложена методика определения частоты радиоимпульсов в акустооптических анализаторах спектра. Проведена оценка разрешающей способности и точности определения частоты.

Постановка проблемы. При мониторинге радиообстановки на определенной территории необходимо в реальном масштабе времени определять параметры источников радиоизлучения. Задача усложняется тем, что современные радиотехнические комплексы во время работы могут изменять основные параметры излучения такие как: частота, длительность импульса, период следования импульсов и многие другие. Для быстрого распознавания и определения параметров радиосигналов, в последнее время, все чаще используются оптические методы обработки радиосигналов, что обусловлено специфическими возможностями таких методов: параллельностью, высокой скоростью и частотой обработки оптических сигналов и т.д.

Эти возможности реализованы, например, в современных акустооптических анализаторах спектра, отличающихся простотой конструкции и параллельной обработкой сигналов в широкой полосе частот и практически в реальном масштабе времени [1 – 7]. Использование достоинств бесприщого спектрального анализа и расширение полосы одновременно анализируемых частот в акустооптических анализаторах спектра обуславливает необходимость более глубокого анализа их разрешающей способности.

Анализ литературы. В большинстве работ, посвященных исследованию разрешающей способности акустооптических анализаторов спектра, эти исследования проводятся с использованием критерия Релея [8]. Так сложилось исторически, по аналогии с разрешающей способностью большинства оптических приборов, например, телескопов. Но в отличие от исследования естественных источников излучения, например, звезд, излучение которых является некогерентным, в акустооптических анализаторах спектра используется когерентное излучение лазера. В последнее время в работах [9, 10], посвященных проблеме повышения разре-

шающей способности акустооптических анализаторов спектра применяются и другие физические принципы. Так в [10] предложена методика повышения разрешающей способности акустооптических анализаторов спектра с учетом нелинейного характера акустооптического взаимодействия. В этом случае анализ акустооптического взаимодействия, протекающего в акустооптических анализаторах спектра, был проведен без интегрирования по времени, которое приводит к сглаживанию флуктуаций.

Как известно, разрешающая способность акустооптических анализаторов спектра в большей степени зависит от размера дифракционного пятна. Для повышения показателей качества функционирования радиотехнических комплексов достаточно часто требуется определение частоты принятого сигнала с разрешением, превышающим ограничения, задаваемые размерами дифракционного пятна, наблюдаемого в акустооптических анализаторах спектра.

Целью данной статьи является анализ методов повышения разрешения по частоте двух неодновременных радиоимпульсов большой длительности, основывающихся на соответствующей обработке радиосигналов в акустооптических анализаторах спектра.

Основные соотношения и формулировки. Будем считать, что на радиотехнический комплекс, включающий в себя акустооптический анализатор спектра, поступают два импульса одинаковой длительности $\tau_{и}$, первый в интервале времени t_1 и t_2 , а второй в интервале t_3 и t_4 , причем $\tau_{и} \gg \frac{D_{лз}}{V_{зв}}$, т.е. импульсы большой длительности, с частотами заполнения ω_1 и ω_2 , такими, что $\omega_1 - \omega_2 \ll \omega_{1,2}$ (рис. 1).

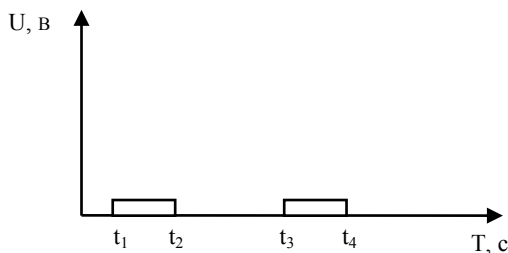


Рис. 1. Входной сигнал (два длинных импульса с близкими несущими частотами)

На выходе акустооптического анализатора спектра спектры анализируемых импульсов будут иметь вид, представленный на рис. 2 (сплошными линиями изображены спектры каждого импульса в отдельности, а штрихо-

вой – результирующая спектра). Ясно, что точность измерения частоты будет определяться величиной $\delta\omega_{\text{ИЗМ}}$, которая зависит от параметров акустооптического анализатора спектра. Эту зависимость можно оценить как $\delta\omega_{\text{ИЗМ}} = 2 \frac{\pi}{a}$, где a – параметр, характеризующий дифракционные характеристики анализатора спектра. Таким образом, видно, что два импульса, пришедших в разные интервалы времени с близкими значениями по частоте $\omega_1 - \omega_2 < \delta\omega_{\text{ИЗМ}}$, не могут быть различимы на основании критерия Релея.

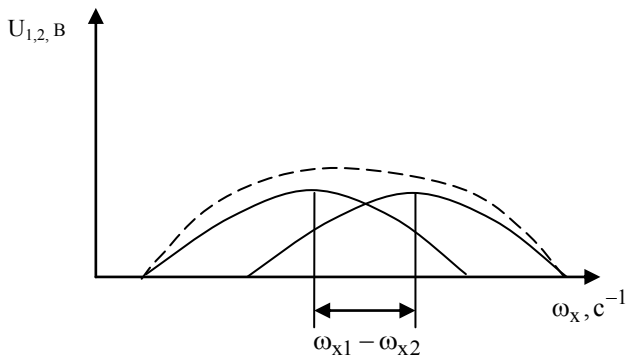


Рис. 2. Выходные сигналы импульсов при малой расстройке частоты

Но, как было отмечено выше, такие импульсы достаточно часто необходимо различать, т.е. измерять частоту с точностью, значительно превышающей точность измерений традиционными методами.

Для решения этой задачи воспользуемся методикой обработки радиолокационных сигналов [11], которая в радиолокации позволяет определять время запаздывания прихода достаточно длинного импульса с точностью, значительно превышающей размеры импульса. Она основывается на том, что при интегрировании импульсного сигнала по стробу переменного знака и дальнейшему суммированию можно получить значение математического ожидания времени прихода сигнала с дисперсией, значительно меньшей длительности импульса.

В данной работе этот подход будет распространен и на измерение пространственного спектра в акустооптических анализаторах спектра.

На рис. 3 представлен наиболее простой случай, когда строб имеет вид двух ступенчатых функций: положительной и отрицательной. Оси $\omega_x, \text{с}^{-1}$ и T , с являются по существу тождественными, так как счет потока фотоэлектронов, является, вообще говоря, функцией времени. Структурная

схема устройства, в котором реализуется предлагаемая методика, представлена на рис. 4.

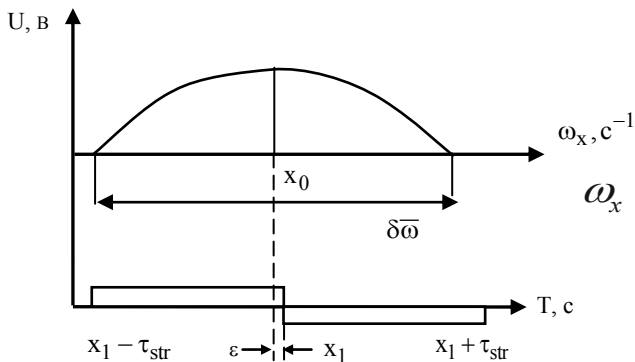


Рис. 3. Стробирование распределения спектра двумя ступенчатыми импульсами

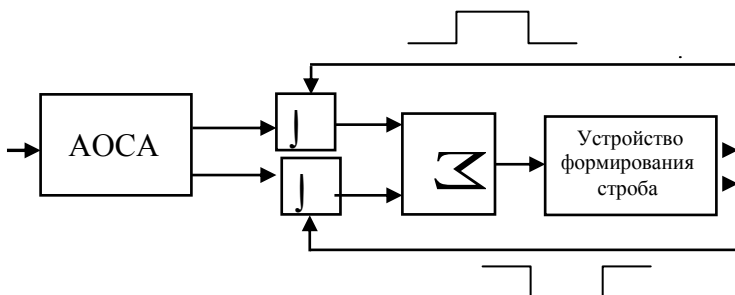


Рис. 4. Структурная схема устройства обработки спектральной информации для повышения разрешающей способности акустооптического анализатора спектра

Как видно, на рис. 3, 4 обработка радиолокационного сигнала сводится к интегрированию сигнала по стробу переменного знака и тогда интеграл по всему стробу можно заменить суммой двух интегралов

$$I = I_1 + I_2,$$

где интегралы I_1 и I_2 можно представить в виде:

$$I_1 = \int_{x_1 - \tau_{\text{str}}}^{x_1} \text{rect} \left(x_1 - \frac{\tau_{\text{str}}}{2} \right) \hat{n}(x) dx; \quad (1)$$

$$I_2 = - \int_{x_1}^{x_1 + \tau_{\text{str}}} \text{rect} \left(x_1 + \frac{\tau_{\text{str}}}{2} \right) \widehat{n}(x) dx, \quad (2)$$

где $\text{rect}(x)$ – прямоугольная импульсная функция; $\widehat{n}(x) = n_s(x) + n_{\text{п}}(x)$ – плотность распределения потока фотоэлектронов; n_s – плотность распределения потока сигнальных фотоэлектронов; $n_{\text{п}}$ – плотность распределения потока помеховых фотоэлектронов.

Для средних значений потока фотоэлектронов справедливо следующее соотношение:

$$\overline{\widehat{n}(x)} = N_s + N_{\text{п}}, \quad (3)$$

где N_s и $N_{\text{п}}$ – средние значения скорости счета по частоте сигнальных и помеховых фотоэлектронов, соответственно.

Как известно [2], плотность распределения потока сигнальных фотоэлектронов в акустооптических анализаторах спектра подчиняется такому закону распределения:

$$n_s(x) \cong N_{s0} \frac{\sin^2 a(x - x_0)}{[a(x - x_0)]^2}, \quad (4)$$

а среднее значение помеховых фотоэлектронов постоянно на всем интервале измерения частоты.

Интегралы I_1 и I_2 в свою очередь можно представить как сумму двух интегралов каждый, соответственно:

$$I_1 = A_1 + B_1; \quad I_2 = A_2 + B_2,$$

где A_i – интегралы, описывающие поведение сигнальной составляющей потока фотоэлектронов, а B_i – помеховой:

$$A_i = \int_{\tau_{\text{str}}} n_s(x) dx, \quad (5)$$

$$B_i = \int_{\tau_{\text{str}}} n_{\text{п}}(x) dx, \quad (6)$$

где обозначение $\int_{\tau_{\text{str}}} n(x) dx$ соответствует интегрированию потока фотоэлектронов по стробу.

Тогда можно составить выражение для функции, которая описывает процесс обработки спектра как $|I_2 - I_1| = (x_1 - x_0) N_{s0}$. Введем значение отклонения x_1 от x_0 как ε . Алгоритм обработки можно представить как

$$A_1 - A_2 + B_1 - B_2 = 2\varepsilon N_{s0}. \quad (7)$$

Устремим выражение ε к нулю, тогда $x_1 \rightarrow x_0$, т.е. граница строба будет соответствовать математическому ожиданию спектральной линии. Тогда величина среднего отклонения ε в соответствии с (7) примет вид

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\overline{A_1 - A_2 + B_1 - B_2}}{2N_{s0}} = 0. \quad (8)$$

Проведем анализ дисперсии величины отклонения x_1 от x_0 в условиях предлагаемой обработки спектральной информации. Хорошо известно, что $D[\varepsilon] = D|I_2 - I_1| = D[I_1] + D[I_2]$ или, учитывая соотношения (6, 7):

$$D[\varepsilon] = D\left[\frac{A_1}{2N_{s0}}\right] + D\left[\frac{A_2}{2N_{s0}}\right] + D\left[\frac{B_1}{2N_{s0}}\right] + D\left[\frac{B_2}{2N_{s0}}\right]. \quad (9)$$

Если считать, что вид пространственного спектра симметричен, то для упрощения анализа можно допустить, что $D[A_1] = D[A_2]$ и $D[B_1] = D[B_2]$.

Тогда выражение для дисперсии ε можно переписать в виде

$$D[\varepsilon] = 2D\left[\frac{A_1}{2N_{s0}}\right] + 2D\left[\frac{B_1}{2N_{s0}}\right]. \quad (10)$$

Для нахождения дисперсии величины ε проанализируем каждое из слагаемых выражения (10). Известно, что постоянные коэффициенты можно выносить из-под знака дисперсии, возведя их во вторую степень. Воспользуемся этим и перепишем первое слагаемое (10):

$$D\left[\frac{A_1}{2N_{s0}}\right] = \frac{1}{4N_{s0}^2} D[A_1] = \frac{1}{4N_{s0}^2} D \int_{x_1 - \tau_{str}}^{x_1} n_s(x) dx. \quad (11)$$

Выражение (10) включает дисперсию от интеграла потока сигнальных фотоэлектронов по стробу. Для дальнейшего анализа выражения (11) необходимо отметить, что поток сигнальных фотоэлектронов в акустооптическом анализаторе спектра, как известно [12] описывается распределением Пуассона. Но одним из основных свойств случайных величин, распределенных по закону Пуассона, является отсутствие взаимной корреляции составных Пуассоновского потока, т.е. каждое значение реализации $n_s(x)$, входящее в интеграл (11), можно считать независимым от предшествующего и последующего. Учитывая вышесказанное, интеграл можно представить бесконечной суммой взаимно независимых составляющих потока сигнальных фотоэлектронов. Но так как дисперсия

суммы, хоть и бесконечной, равна сумме дисперсий, то дисперсию можно внести под знак интеграла

$$D\left[\frac{A_1}{2N_{s0}}\right] = \frac{1}{4N_{s0}^2} \int_{x_1-\tau_{str}}^{x_1} D[n_s(x)] dx. \quad (12)$$

Подставим в (12) выражение (4) и получим выражение

$$D\left[\frac{A_1}{2N_{s0}}\right] = \frac{1}{4N_{s0}^2} \int_{x_1-\tau_{str}}^{x_1} D\left[n_s(x) \frac{\sin^2 a(x-x_0)}{[a(x-x_0)]^2}\right] dx. \quad (13)$$

Отношение $\sin x/x$ в выражении (13) является постоянным, т.е. не изменяющимся от реализации к реализации и поэтому его тоже можно вынести за знак дисперсии

$$D\left[\frac{A_1}{2N_{s0}}\right] = \frac{1}{4N_{s0}^2} \int_{x_1-\tau_{str}}^{x_1} \frac{\sin^4 a(x-x_0)}{[a(x-x_0)]^4} D[n(x)] dx. \quad (14)$$

Но для распределения Пуассона характерно равенство математического ожидания и дисперсии. Воспользовавшись и этим замечанием, выражение для дисперсии (14) можно окончательно представить в таком виде:

$$D\left[\frac{A_1}{2N_{s0}}\right] = \frac{1}{4N_{s0}^2} \int_{x_1-\tau_{str}}^{x_1} \frac{\sin^4[a(x-x_0)]}{[a(x-x_0)]^4} N_{s0} dx, \quad (15)$$

но этот интеграл уже легко сводится к табличному, и в результате мы получаем

$$D\left[\frac{A_1}{2N_{s0}}\right] = \frac{\pi}{3aN_{s0}}. \quad (16)$$

Если воспользоваться соотношением между a и $\delta\omega_{изм}$, тогда (16) можно представить в виде

$$D\left[\frac{A_1}{2N_{s0}}\right] = \frac{\delta\omega_{изм}}{6N_{s0}}. \quad (17)$$

При умножении числителя и знаменателя в выражении (17) и учитывая равенство дисперсий по симметричному стробу для дисперсии сигнальной компоненты, получим соответствующее выражение

$$D\left[\frac{A}{2N_{s0}}\right] = \frac{\delta\omega_{изм}^2}{3W_s}, \quad (18)$$

где W_s – энергия измеряемого оптического сигнала (W_s – безразмерная величина, так как в нашем случае под энергией оптического сигнала подразумевается общее число фотонов).

Проведя аналогичные рассуждения, можно получить выражение и для дисперсии ε , обусловленной помеховой составляющей потока фотоэлектронов:

$$D\left[\frac{B}{2N_{s0}}\right] = \frac{N_{\Pi}}{N_{s0}} \cdot \frac{\delta\omega_{\text{ИЗМ}}^2}{W_s}. \quad (19)$$

Таким образом, дисперсия измерения частоты сигнала принимает вид

$$D[\varepsilon] = \frac{\delta\omega_{\text{ИЗМ}}^2}{W_s} \left(\frac{1}{3} + \frac{N_{\Pi}}{N_s} \right). \quad (20)$$

Из (20) видно, что дисперсия измерения частоты сигнала пропорциональна ширине измеряемого спектра и обратно пропорциональна энергии сигнала. Но в тоже время из (20) видно, что и при отсутствии помеховой составляющей дисперсия измерения частоты сигнала будет отлична от нуля ввиду квантового характера процессов, протекающих в акустооптическом анализаторе спектра. Очевидно, что увеличивая энергию оптического потока, можно достичь соотношения: $D[\varepsilon] \ll \delta\omega_{\text{ИЗМ}}^2$, что позволит значительно точнее измерять частоту радиоимпульса большой длительности.

Таким образом, в результате использования предложенной методики обработки сигналов в акустооптических анализаторах спектра разрешающая способность акустооптических анализаторов спектра может быть значительно улучшена по сравнению с методиками, основанными на использовании критерия Релея.

Выводы. Существующие аппаратные ограничения разрешающей способности акустооптических анализаторов спектра, основанные на критерии Релея, не являются предельными. С помощью разнообразных методик обработки сигналов можно существенно повысить разрешающую способность по частоте акустооптических анализаторов спектра.

Дальнейшие исследования необходимо направить на разработку оптимальных алгоритмов измерения частоты оптического сигнала в акустооптических анализаторах спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парыгин В.Н., Балакий В.И., Волошинов В.Б. *Электрооптика, акустооптика и оптическая обработка информации на кафедре физики колебаний МГУ // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 7. – С. 775 – 792.*

2. Парыгин В.Н., Балаковский В.И. *Оптическая обработка информации*. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 142 с.
3. Акаев А.А., Майоров С.А. *Оптические методы обработки информации*. – М.: Высш. шк., 1988. – 237 с.
4. *Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / Под ред. С.В. Кулакова*. – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.
5. Lee Wei, Chen Shu-Hsia *Acousto-optical effect induced by ultrasound pulses in a nematic liquid-crystal film // Appl. Opt.* – 2001. – 40, № 10. – P. 1682 – 1685.
6. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применение*. – М.: Сов. радио, 1989. – 112 с.
7. Кулаков С.В. *Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов*. – Л.: Наука, 1978. – 144 с.
8. Белошицкий Л.П., Комаров В.Н., Крехотень Б.Н., Сапожников Б.Т. *Акустооптические анализаторы спектра сигналов // Зарубежная радиоэлектроника*. – 1981. – № 3. – С. 51 – 70.
9. Стрелков А.И., Стадник А.М., Марченко В.В. *Частотное разрешение импульсных сигналов в некогерентных акустооптических спектроанализаторах // Системи обробки інформації*. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 4(20). – С. 33 – 40.
10. Стрелков А.И., Можяев А.А., Марченко В.В. *К вопросу о разрешающей способности монохроматических радиосигналов по частоте акустооптических спектроанализаторов // Системи обробки інформації*. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 6(22) – С. 33 – 40.
11. Левин Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники*. Кн. 2. – М.: Сов. радио. – 392 с.
12. Стрелкова Т.А., Стадник А.М., Калмыков С.И. *Квазиоптимальное обнаружение парнокоррелированных сигналов в сильных пуассоновских шумах // Системи обробки інформації*. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 3(19). – С. 184 – 192.

Поступила 28.05.2003

СТРЕЛКОВ Александр Иванович, доктор техн. наук с 1988 года, профессор, главный научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1965 году окончил ВИРТА ПВО. Область научных интересов – квантовая электроника, прикладная оптика, оптико-электронные средства в статистической обработке оптических сигналов.

МОЖАЕВ Александр Александрович, канд. ф-м. наук с 1990 года, ст. научн. сотр., вед. научн. сотр. научного центра при ХВУ. В 1980 году окончил радиофизический факультет ХГУ. Область научных интересов – проблемы распространения радиосигналов различных диапазонов, нелинейное взаимодействие радиоволн в различных средах.

МАРЧЕНКО Василий Васильевич, зам. главного инженера СКБ “Топаз” (Донецк). В 1985 году окончил Таганрогский радиотехнический институт. Область научных интересов – статистическая обработка оптических сигналов в радиолокационных системах.