

УДК 621.371

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПРОСТРАНСТВЕННО-КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА
ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

И. М. Орошук, В. Н. Долгих, А. Н. Сучков

**Филиал военного учебно-научного центра ВМФ «Военно-морская академия»
(г. Владивосток)**

Статья получена 2 декабря 2013 г.

Аннотация. В статье представлены: результаты исследования пространственно-корреляционного способа обработки сигналов в декаметровом диапазоне частот, которые показали потенциальную возможность существенного повышения помехоустойчивости систем обнаружения – возможность выделения полезного сигнала на фоне энергетически превосходящих помех; экспериментальные распределения плотности вероятности сигналов и помех на выходе пространственно-корреляционного тракта обработки, с учетом которых показаны вероятностные оценки помехоустойчивости системы обнаружения.

Ключевые слова: ионосфера, сигнал, помеха, статистический закон распределения, функция взаимной корреляции, критерий Неймана - Пирсона.

Abstract: The paper deals with research findings of spatial correlation of signal processing in decameter range that reveals the increased capability of detecting system noise-immunity and option of specifying out the desired signal among the superior interferences. The experimental dependences of signal and noise statistical law in spatial correlation processing chain output are presented and adjusted for noise-immunity probability evaluation of detecting system.

Keywords: ionosphere, signal, noise, statistical law, cross-correlation function, Neumann–Pirson criterion.

Введение

В задачах определения пространственных координат различных объектов первым является этап обнаружения сигнала от источника излучений. В этом случае на вход тракта обработки поступает аддитивная смесь полезного сигнала и помехи, которая является случайной функцией пространства и времени, что объясняется природой сигналов и помех.

Ионосфера как волновод распространения сигналов имеет ряд специфических особенностей: зависимость ее свойств от воздействия гамма-излучений Солнца, а также магнитного поля Земли. Все эти факторы носят случайный характер и вызывают флуктуационные изменения состояния ионосферы, выраженные стохастическим изменением концентрации электронов в той или иной ее области. Это изменяет рефракционные, дифракционные, поляризационные и другие свойства радиоволн, распространяющихся через ионосферу. В результате в точке приема наблюдается случайный процесс, состоящий из множества сигналов, пришедших по разным траекториям, за счет многолучевости распространения радиоволн [1].

Наличие помех во входном процессе связано с естественными помехами, формируемыми, прежде всего, за счет теплового движения заряженных частиц среды распространения радиоволн (Земли, атмосферы и ионосферы) и искусственными помехами, вызванными работой различных радиостанций, электронных, электромеханических и других радиотехнических устройств.

Случайные процессы обладают тем свойством, что их мгновенные значения, наблюдаемые в один момент времени, в какой-то мере определяют мгновенные значения этих процессов в последующие моменты времени. В данном случае речь идет о статистической взаимосвязи процесса или процессов во времени. Количественную и качественную оценку статистической взаимосвязи случайных процессов в пространстве и во времени можно получить с помощью взаимных корреляционных и автокорреляционных функций. Используя эти оценки, с учетом сохранения высокой корреляционной связи сигналов, при достаточно больших пространственных разностях точек наблюдения, удастся

достоверно выделять полезный сигнал на фоне помех, не имеющих таких связей или имеющих значительно меньшие по величине значения корреляционных функций, а также создавать направленные приемные и излучающие радиотехнические системы [2].

Принцип выделения сигналов, заложенный в пространственно-корреляционном способе, основан на использовании разнесенных в пространстве элементов антенной решетки (АР) и статистических методов обработки путем оценки функций взаимной корреляции (ФВК) принятых пространственно-разнесенных сигналов. Примером реализации такой системы является пространственно-корреляционный тракт обработки (ПКТО) (рис. 1), который представляет собой дискретную приемную систему, построенную на основе использования АР с трактом обработки выходных сигналов, включающим блок усиления, многоканальный аналого-цифровой преобразователь, блок временных задержек, тракт корреляционной обработки и устройство принятия решения (УПР) [3].

Для выбора вероятностного метода обработки и оптимизации параметров УПР, позволяющего выделить полезный сигнала на фоне помех, необходимо знать статистический закон распределения выходного процесса пространственно-корреляционного тракта, поступающего на вход УПР.

1. Пространственно-корреляционный тракт обработки

Принцип функционирования пространственно-корреляционного тракта обработки проиллюстрирован на рис. 1.

Сигнал источника излучений поступает на пространственно-разнесенные элементы АР. Далее выходные сигналы подвергаются предварительной фильтрации, усиливаются и преобразуются в цифровую форму, откуда они поступают в блок временных задержек. В блоке временных задержек осуществляется формирование характеристики направленности и сканирование пространства путем введения искусственных временных задержек τ_i во входные сигналы. Ввод временных задержек на каждом этапе сканирования виртуально

позиционирует элементы АР на одну линию ортогональную направлению прихода сигнала (см. рис. 1).

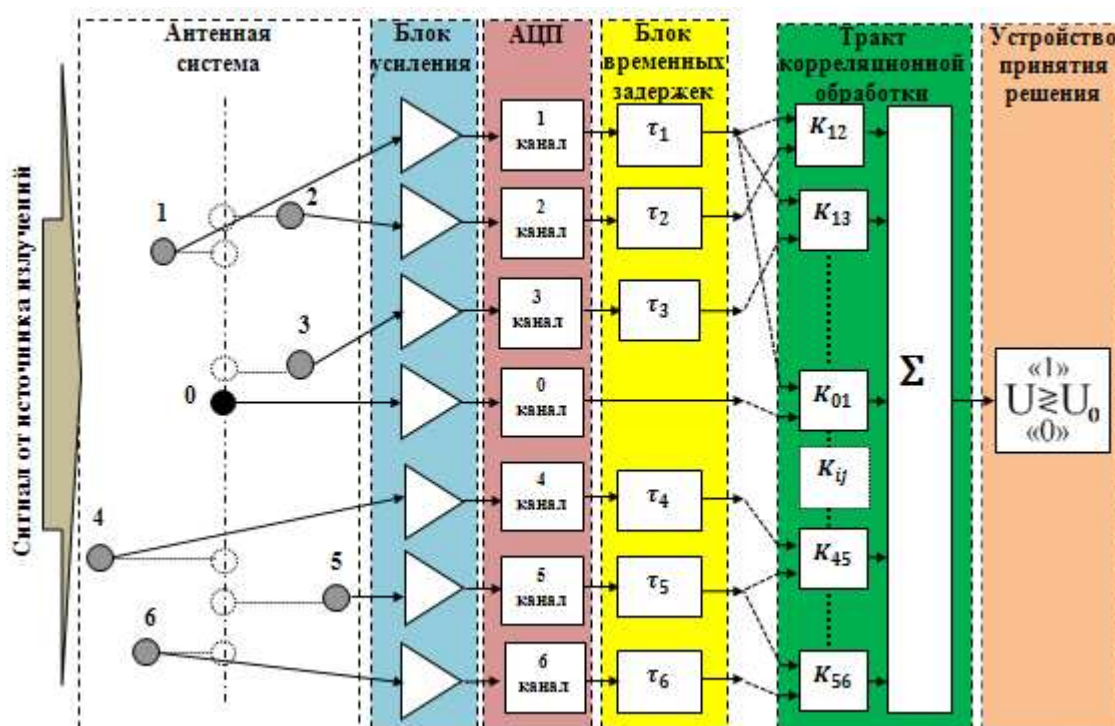


Рис. 1. Функциональная схема основных узлов пространственно-корреляционного тракта обработки.

В тракте корреляционной обработки производится оценка ФВК сигналов с выходов всех пар элементов АР с последующим их суммированием:

$$U_k = 2 \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j \neq i}^I \left[\sigma_{s,i} \sigma_{s,j} \rho_{s,ij}(\tau - \tau_k) + \sigma_{n,i} \sigma_{n,j} \rho_{n,ij}(\tau - \tau_k) \right], \quad (1)$$

где $\sigma_{s,i}$, $\sigma_{s,j}$, $\sigma_{n,i}$, $\sigma_{n,j}$ – среднеквадратическое отклонение напряжений сигналов и помех на выходах элементов антенной решетки;

$\rho_{s,ij}(\tau - \tau_k)$, $\rho_{n,ij}(\tau - \tau_k)$ – коэффициенты взаимной корреляции (КВК) напряжений сигналов и помех на выходах разных элементов АР;

τ_k , τ – компенсационные и естественные временные задержки сигналов, обусловленные разностью времени распространения сигнала до элементов АР;

I – количество элементов АР.

Выходное напряжение сумматора поступает на вход УПР ПКТО. Решение

о наличии или отсутствии полезного сигнала принимается по результатам сравнения входного процесса УПР с пороговым уровнем, величина которого зависит от заданных значений вероятностных характеристик обнаружения сигнала.

2. Эмпирическое определение закона распределения вероятности входных процессов пространственно-корреляционного тракта обработки сигналов

Для эмпирического определения статистического закона распределения выходных процессов ПКТО вначале был определен статистический закон распределения его входных процессов. С учетом того, что входной процесс представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала и помехи, законы распределения входных сигналов и помех проанализированы в отдельности [4].

Для определения законов распределения были проведены экспериментальные исследования. В качестве измерительного оборудования использовалось устройство для оценки пространственно- и частотно-корреляционных свойств ионосферных волн декаметрового диапазона [5, 6], представляющее по сути двухканальный ПКТО.

Метрологическая оценка точности измерительного оборудования показала, что относительная погрешность оценки КВК в области частот от 3 до 16 МГц составляет не более 1,7 %, в области частот от 16 до 23 МГц – 3 % и в области частот от 23 до 30 МГц – 10 % [3].

Для анализа закона распределения плотности вероятности излучаемых сигналов записан и проанализирован амплитудно-модулированный сигнал с центральной частотой 9,7 МГц (рис. 2). С помощью специально разработанной программы «Spectral-correlation direction finder» [7] произведена его узкополосная фильтрация в полосе частот $\Delta f = 6$ кГц. На основе полученных данных был рассчитан статистический ряд распределения (рис. 3).

Как видно из рис. 3, узкополосный сигнал имеет распределение вида $W(u_{\text{сигн}}) = \arcsin(u_{\text{сигн}})$.

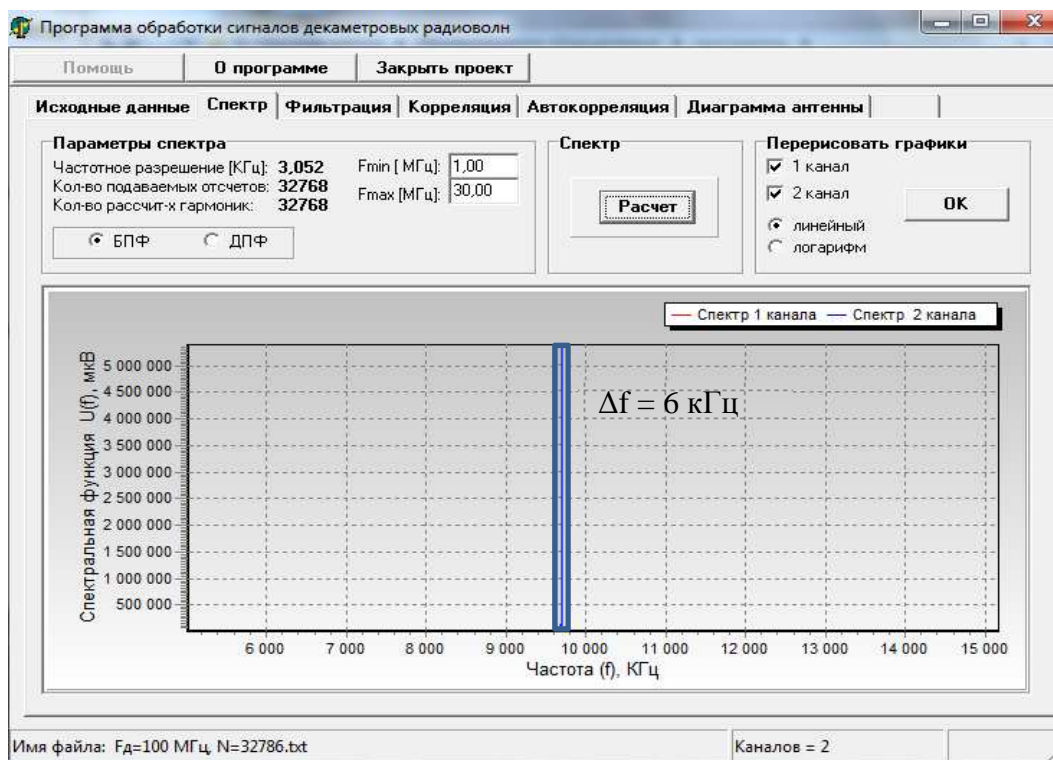


Рис. 2. Спектр амплитудно-модулированного сигнала частотой 9,7 МГц в интерфейсе программы «Spectral-correlation direction finder».

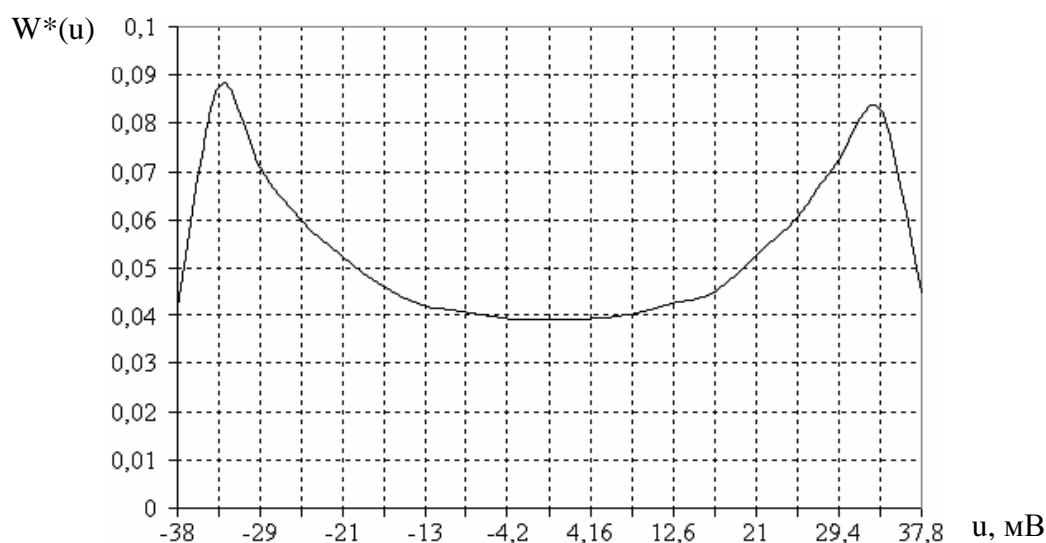


Рис. 3. Огибающая гистограммы статистического ряда распределения амплитудно-модулированного сигнала с центральной частотой 9,7 МГц после полосовой фильтрации $\Delta f = 6$ кГц.

Для определения закона распределения шумового процесса был изучен спектр нескольких его реализаций. Для этого выбран участок спектра с явным отсутствием дискретных составляющих от каких-либо из сигналов в районе частоты 9,5 МГц

(рис. 4) и произведена его фильтрация в полосе частот $\Delta f = 6$ кГц.

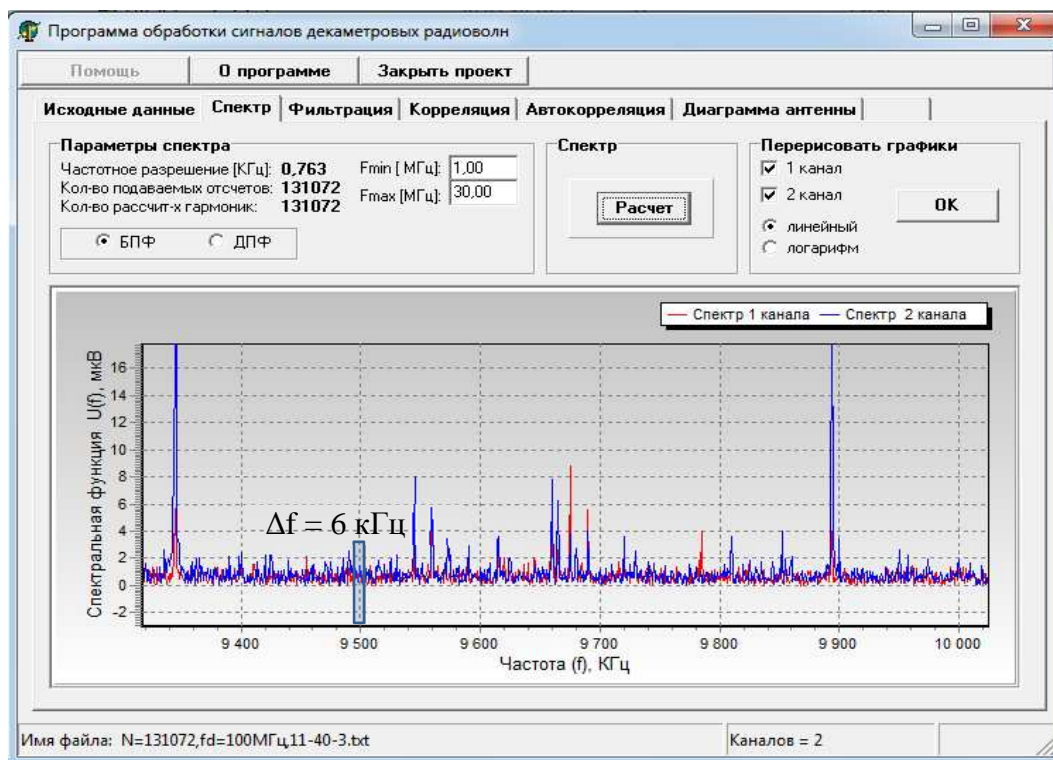


Рис. 4. Спектр шумового процесса в области частоты 9,5 МГц в интерфейсе программы «Spectral-correlation direction finder».

На основе статистической обработки шумового процесса рассчитан статистический ряд распределения (рис. 5).

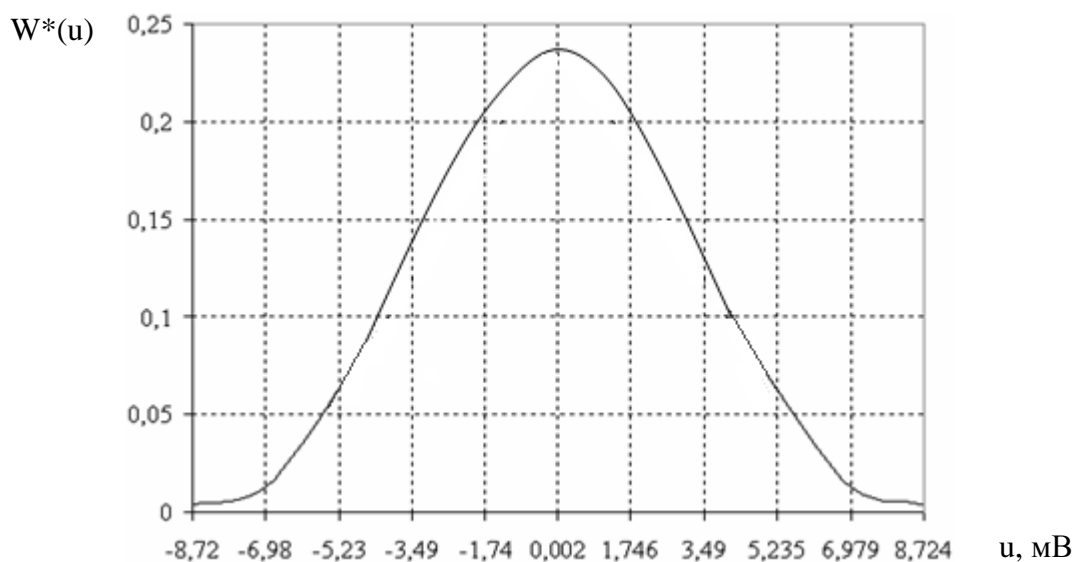


Рис. 5. Огибающая гистограммы статистического ряда распределения шумового процесса со средней частотой 9,5 МГц, при полосе фильтрации $\Delta f = 6$ кГц.

Анализ огибающей гистограммы статистического ряда распределения шумового процесса, проиллюстрированного на рис. 5, и дополнительные расчеты показали, что шумовой процесс, согласно критерию χ^2 Пирсона, стремится к гауссовому распределению с вероятностью 65,3 %.

Таким образом, получено, что входной процесс ПКТО декаметрового диапазона, представляющий собой случайную функцию смеси сигналов и помех, должен иметь распределение в виде композиции гауссового закона и распределения вида $W(u_{\text{сигн}}) = \arcsin(u_{\text{сигн}})$.

Для проверки выдвинутой гипотезы выбраны и обработаны реализации случайного процесса с явным присутствием дискретных составляющих от вещательной радиостанции на частоте 9,675 МГц (рис. 6), произведена его фильтрация в полосе частот $\Delta f = 6$ кГц. На основе полученных данных рассчитан статистический ряд распределения (рис. 7).

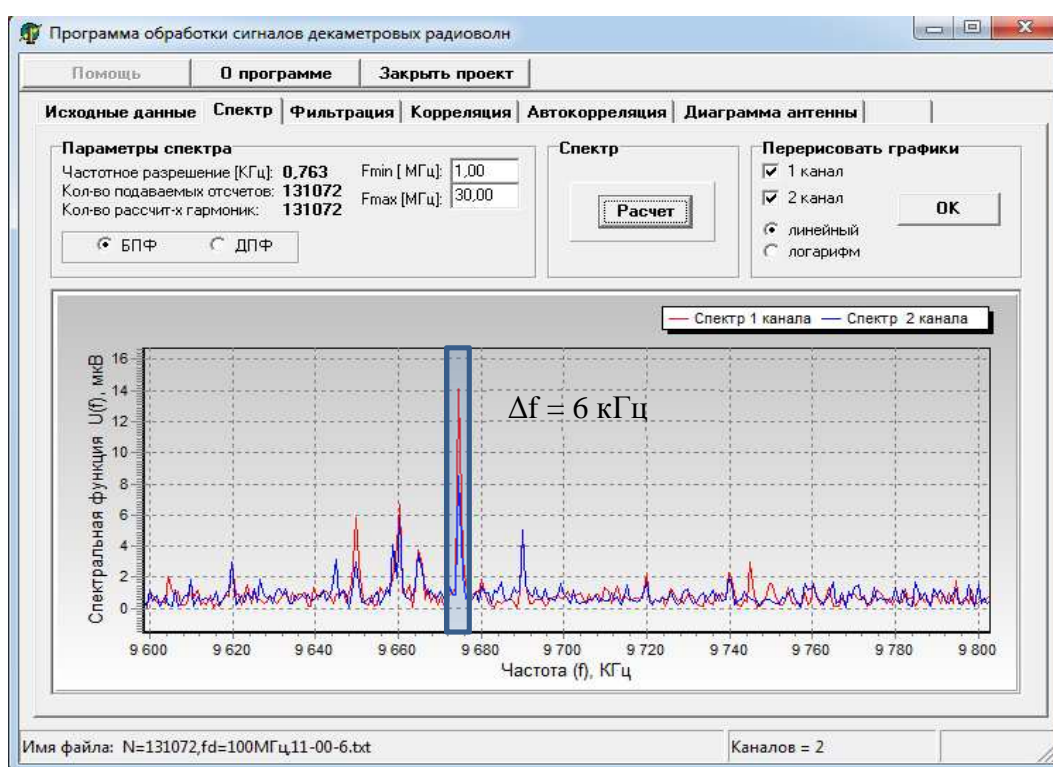


Рис. 6. Спектр сигнала частотой 9,675 МГц на фоне помех в интерфейсе программы «Spectral-correlation direction finder», при полосе фильтрации $\Delta f = 6$ кГц.

Визуальный анализ полученной зависимости (см. рис. 7) подтверждает выдвинутую гипотезу о том, что случайный процесс на входе ПКТО, представляющий собой случайную функцию смеси сигналов и помех, имеет распределение, представляющее собой композицию гауссового распределения и распределения вида $W(u_{\text{сигн}}) = \arcsin(u_{\text{сигн}})$.

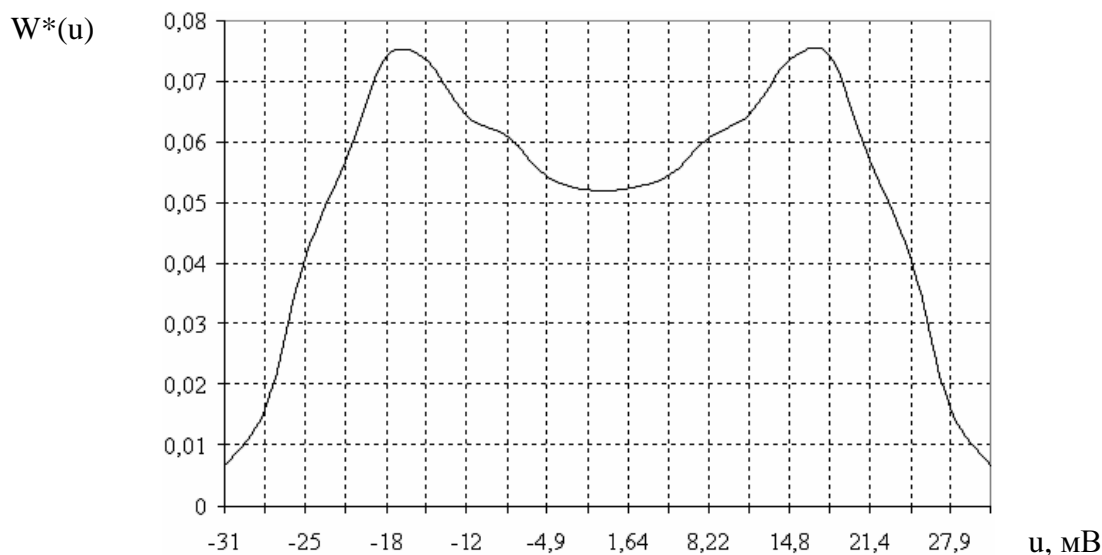


Рис. 7. Огибающая гистограммы статистического ряда распределения сигнала частотой 9,675 МГц после полосовой фильтрации $\Delta f = 6$ кГц.

2. Эмпирическое определение закона распределения плотности вероятности выходного процесса пространственно-корреляционного тракта обработки сигналов

В ПКТО после предварительной фильтрации и аналого-цифрового преобразования входных сигналов происходит оценка функции взаимной корреляции между сигналами, поступившими со всех пар элементов АР, с последующим их суммированием и сравнением с пороговым уровнем в УПР. То есть выходным процессом ПКТО является сумма оценок ФВК всех пар элементов АР.

Для оценки функции распределения на выходе ПКТО проведен статистический анализ ее выходного процесса. В качестве пары элементов АР ПКТО использовалось измерительное устройство для оценки пространственно- и частотно-корреляционных свойств ионосферных волн декаметрового диапазона.

Так как диапазон амплитуд входных сигналов изменялся в больших пределах, при статистическом анализе обрабатывались нормированные значения ФВК – коэффициенты взаимной корреляции.

Оценка КВК между двумя пространственно-разнесенными каналами определяется следующим выражением:

$$\rho_{ij}(s) = \frac{\sum_{k=1}^N u_{ik} u_{jk+s_{ij}}}{N\sigma_i\sigma_j}, \quad (2)$$

где N – объем выборки входных сигналов;

u_{ik} – отсчеты мгновенного значения напряжения сигнала, поступающего с i -го приемного радиоканала измерительного оборудования;

u_{jk} – отсчеты мгновенного значения напряжения сигнала, поступающего со j -го приемного радиоканала измерительного оборудования;

σ_i – эффективное значение напряжения, поступающего с i -го приемного радиоканала измерительного оборудования;

σ_j – эффективное значение напряжения, поступающего с j -го приемного радиоканала измерительного оборудования.

s – число отсчетов на которое осуществляется сдвиг процессов.

В данном выражении знаменатель является постоянной величиной ($N\sigma_i\sigma_j = \text{const}$), следовательно, на закон распределения величины КВК влияет только числитель выражения (2) – сумма произведений дискретных значений напряжений 1-го и 2-го приемных устройства для оценки пространственно- и частотно-корреляционных свойств ионосферных волн декаметрового диапазона.

Для определения закона распределения выходных процессов ПКТО использован входной радиосигнал с центральной частотой 9,675 МГц, отфильтрованный в полосе частот $\Delta f = 6$ кГц с объемом выборки $N = 65536$ и длительностью 655 мкс.

Согласно выражению (2) произведено суммирование произведений мгновенных значений напряжения с двух пространственно-разнесенных

каналов. Полученный статистический ряд распределения сумм произведений дискретных значений напряжения с двух пространственно-разнесенных каналов измерительного оборудования представлен на рис. 8.

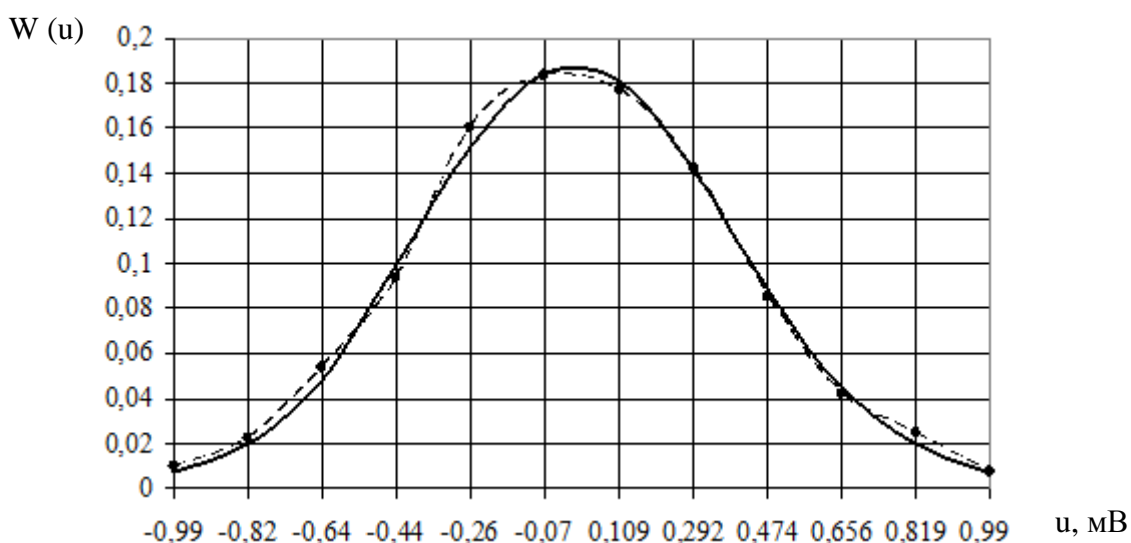


Рис. 8. Огибающая гистограммы статистического ряда распределения выходного сигнала $W^*(u)$ и теоретического гауссового распределения $W(u)$.

Анализ зависимости (см. рис. 8) показывает, что огибающая гистограммы статистического ряда распределения выходного процесса ПКТО, изображенная на графике в виде тонкой пунктирной линии с точками, стремится к усеченному гауссовому закону:

$$W(u, \bar{u}, \sigma, u_1, u_2) = \begin{cases} 0, & \text{при } u \leq u_1; \\ \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma^2}}, & \text{при } u_1 < u \leq u_2; \\ 0, & \text{при } u > u_2, \end{cases} \quad (3)$$

где A – нормирующий коэффициент, $A = \frac{1}{\Phi_0\left[\frac{u_2 - \bar{u}}{\sigma}\right] - \Phi_0\left[\frac{u_1 - \bar{u}}{\sigma}\right]}$,

$$(\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \text{интеграл вероятности});$$

u_1 и u_2 – границы области определения случайной величины u ;

\bar{u} – среднее значение (математическое ожидание) случайной величины u ;

σ – среднеквадратическое отклонение случайной величины u от математического ожидания.

Огибающая теоретического усеченного гауссового закона распределения изображена на рис. 8 жирной линией.

Проверка гипотезы сходимости статистического ряда распределения выходного процесса ПКТО с гауссовым законом распределения осуществлялась на основе критерия согласия χ^2 Пирсона, вследствие чего гипотеза о том, что выходной процесс ПКТО распределен по усечённому гауссовому закону, считается правдоподобной с вероятностью 0,85. Гауссовый закон распределения подтверждает также расчетные величины третьего центрального момента (коэффициента асимметрии или скоса) $S_k = -3,2 \cdot 10^{-4}$, а также четвертого центрального момента (коэффициент крутости или эксцесса) $E_x = -0,084$, которые применяются в более простых критериях и должны стремиться к нулю.

4. Вероятностные оценки обнаружения полезного сигнала

Учитывая тот факт, что выходной процесс ПКТО при наличии полезного сигнала подчиняется усечённому гауссовому закону распределения, оптимальный способ обнаружения полезного сигнала на фоне гауссовых помех в УПР ПКТО целесообразно осуществлять на основе классического критерия обнаружения Немана – Пирсона – по минимуму вероятности пропуска цели $P_{пр}$ при заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ [8].

В работе [9] получено выражение для определения вероятности пропуска цели $P_{пр}$ для рассмотренного выше пространственно-корреляционного тракта обработка при условии гауссового закона распределения обработанного сигнала на входе УПР:

$$P_{\text{пр}} = \Phi \left(\frac{\Phi^{-1}[1 - P_{\text{лт}}] \sqrt{L + \sum_{i < j} \rho_{n,ij}^2} - 2\sqrt{K}q^2 \sum_{i < j} \rho_{n,ij}}{\sqrt{L(q^2 + 1)^2 + 2 \sum_{i < j} (\rho_{s,ij}q^2 + \rho_{n,ij})^2}} \right), \quad (4)$$

где $\Phi^{-1}(x)$ – обратная функция интеграла вероятности;

q – отношение эффективного значения напряжения сигнала к помехе

$$(q = \frac{\sigma_s}{\sigma_n});$$

L – количество корреляторов, $L = I^2 - I$;

K – объем выборки в ПКТО.

Из выражения (4) видно, что вероятность пропуска цели $P_{\text{пр}}$ УПР при использовании ПКТО в декаметровом диапазоне в значительной степени зависит от пространственно-корреляционных свойств сигналов $\rho_{s,ij}$ и помех $\rho_{n,ij}$. В связи с чем эффективность применения ПКТО в большей степени определяется пространственно-корреляционными свойствами сигналов и помех.

Результаты экспериментальных исследований, описанные в работе [4], показали, что значения КВК сигналов декаметрового диапазона при пространственном разnose приемных антенн до 500 м остаются высокие и изменяются в зависимости от частоты сигнала в небольшом пределе от 0,81 до 0,85 (рис. 9). В свою очередь значения пространственно-корреляционной связи помех сохраняются в небольших пределах: величина пространственного интервала корреляции составляет не более 4 м (см. рис. 9). При разnose антенн на расстояние, превышающее интервал корреляции помех d_0 , наблюдается флуктуация амплитуды КВК вдоль оси абсцисс в пределах $\pm 0,1$, причем с расширением полосы фильтрации входных процессов пространственный интервал корреляции и амплитуда флуктуаций КВК уменьшаются.

На рис. 10 приведен пример зависимости вероятности пропуска цели $P_{\text{пр}}$ от величины взаимной корреляции помех $\rho_{n,ij}$, с учетом описанных выше результатов исследований пространственно-корреляционных свойств сигналов

и помех для одного из вариантов ПКТО.

Из рис. 10 видно, что при снижении взаимной корреляции между помехами $\rho_{n,ij}$ уменьшается вероятность пропуска цели $P_{пр}$ и соответственно повышается вероятность правильного обнаружения сигнала ($P_{обн} = 1 - P_{пр}$) ПКТО; в частности, при $\rho_n = 0,1$ в системах обнаружения потенциально можно достигнуть вероятность пропуска цели менее $P_{пр} = 10^{-5}$.

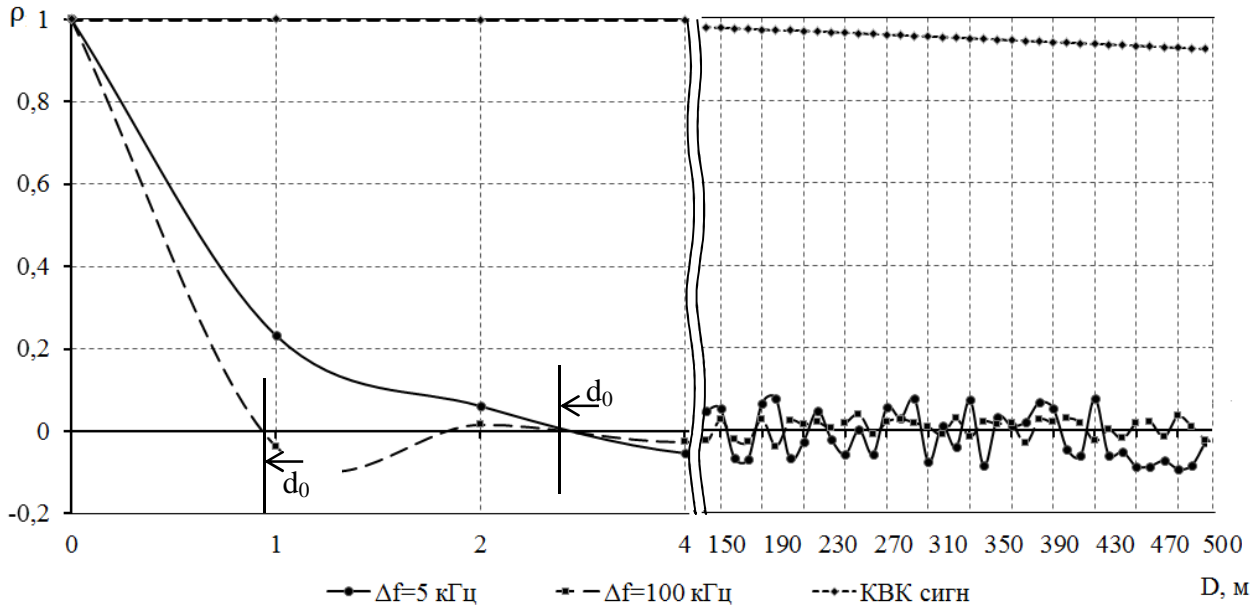


Рис. 9. Экспериментальные пространственно-корреляционные зависимости КВК сигналов с центральной частотой 3,2 МГц и помех в области 3,3 МГц.

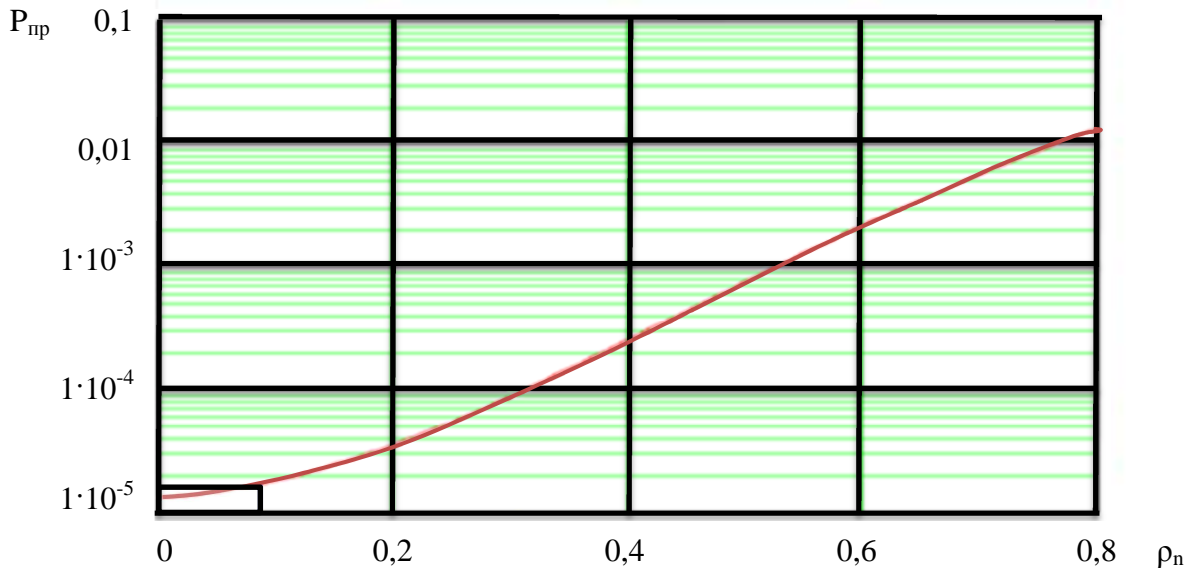


Рис. 10. Зависимость вероятности пропуска цели от коэффициента корреляции помех.

На основании приведенных пространственно-корреляционных свойств сигналов и помех (см. рис. 9) и зависимости вероятности пропуска цели $P_{\text{пр}}$ ПКТО от коэффициента корреляции помех ρ_n (см. рис. 10) можно сделать вывод, что при разносе антенн на расстояния, превышающие пространственный интервал корреляции помех d_0 , вероятность пропуска цели $P_{\text{пр}}$ в большей степени будет зависеть от пространственно-корреляционных свойств помех ρ_n .

Учитывая выявленные закономерности, можно подобрать такую конфигурацию антенной системы ПКТО, при которой корреляционная связь для сигналов будет высокой, а для помех, в случае расположения элементов АР на расстояниях, превышающих пространственный интервал d_0 , принимать минимальные значения или взаимно компенсироваться, за счет разных знаков КВК помех [см. второй член выражения (1)]. Это позволит обеспечить максимальную эффективность использования пространственно-корреляционного метода обработки и существенно повысить отношение уровня сигнала к помехе на выходе тракта обработки сигналов, т.е. значительно повысить энергетическую чувствительность ПКТО.

Результаты экспериментальных исследований рассмотренного метода обработки [3] показали другие его преимущества: возможность формирования «острых» характеристик направленности (менее 1 градуса), снижение поля боковых максимумов характеристик направленности при малых отношениях сигнала к помехе, возможность достоверного обнаружения сигналов при энергетическом превосходстве помехи на входе АР [9]. Данные особенности выделяют пространственно-корреляционный метод перед другими способами обработки.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что выходной процесс пространственно-корреляционного тракта обработки распределен по усечённому гауссовому закону, в связи с этим оптимальный метод принятия решения целесообразно строить на основе критерия Неймана -

Пирсона.

С учетом физических особенностей пространственно-корреляционных свойств сигналов и помех в декаметровом диапазоне, на основе анализа полученной оценки помехоустойчивости определено, что эффективность корреляционного пространственного фильтра зависит, прежде всего, от пространственно-корреляционных свойств помех, которые определяют требования к минимальному разнесу элементов антенной решетки фильтра. Пространственно-корреляционные свойства сигналов определяют наибольший разнос элементов антенной решетки и, соответственно, наибольшие размеры всей антенной системы.

Литература

1. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн. – М., 1971. – 184 с.
2. Киншт Н.В., Долгих В.Н., Орощук И.М. и др. Поисковые исследования принципов построения дискретных антенных систем со случайно расположенными элементами для перспективных радиотехнических средств коротковолнового диапазона: отчет о НИР «Шаланда» (заключ.). – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН; ТОВМИ, 2007. – 114 с.
3. Долгих В.Н., Орощук И.М., Бородин А.Е. и др. Разработка математических моделей и программно-алгоритмического обеспечения устройств синтеза диаграмм направленности и пространственно-временной обработки сигналов в неэквидистантной ФАР со случайно расположенными элементами: отчет о НИР «Воздух» (заключ.). – Владивосток: ТОВМИ, 2007. – 120 с.
4. Долгих В.Н. Пространственно-корреляционные свойства сигналов и помех декаметрового диапазона / В. Н. Долгих, И. М. Орощук, А. Н. Сучков ; под ред. В. С. Колмогорова. – Владивосток : Филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Н.Г. Кузнецова», 2013. – 112 с. : ил.
5. Устройство для оценки пространственно- и частотно-корреляционных

ионосферных волн декаметрового диапазона [Текст] : пат. 100287 Рос. Федерация : МПК G01R 29/08 / В.Н. Долгих, И.М. Орощук, А.Н. Сучков, М.В. Васильев ; заявитель и патентообладатель ТОВМИ ВУНЦ ВМФ «ВМА». – № 2010127606/28 ; заявл. 02.07.2010 ; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34. – 2 с.

6. Орощук И.М., Сучков А.Н. Устройство для оценки пространственно-корреляционных свойств электромагнитных сигналов декаметрового диапазона // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники: сборник научных трудов. – Владивосток: ТОВМИ, 2007. – Вып. 63. – С. 169-174.
7. А.с. 2009613322 Российская Федерация. Двухканальный спектрально-корреляционный анализатор-пеленгатор / И.М. Орощук, И.А. Линник, А.Н. Сучков, М.В. Васильев (RU); правообладатель Орощук И.М. – № 2009612158; заявл. 08.05.2009; опубл. 25.06.2009.
8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники: в 3 т. – М.: Советское радио, 1975.
9. Долгих В.Н., Орощук И.М., Прищепа М.В. Вероятностные характеристики обнаружения сигналов корреляционным пространственным фильтром // Акустический журнал. – М. – 2007. – № 2. – С. 226-232.