

Пространственная и временная когерентность сигналов в пространственно-распределённой информационной системе радиолокационных модулей

А. И. Полубехин

Определены основные характеристики пространственно-распределённых информационных систем радиотехнического мониторинга, пространственно-временная автокорреляционная функция (АКФ), угло-поляризационная нормированная АКФ, время-частотная АКФ и временная когерентность сигналов в позициях. Выявлены особенности когерентной обработки временного пачечного сигнала, у которого значения задержек и доплеровской частоты практически одинаковы для всей пачки сигналов.

Ключевые слова: распределённая информационная система радиотехнического мониторинга, радиолокационная система, автокорреляционная функция, пачечный сигнал, помеха.

1. Введение

Любая радиолокационная система (РЛС) работает при наличии различного рода помех – естественных либо искусственных. Искусственные помехи в случае радиолокации подразумевают наличие источника активных помех (ИАП), предназначенного для нарушения нормальной работы РЛС. Рассмотрим случай отсутствия ИАП, когда на работу РЛС влияют только естественные помехи, обусловленные собственными шумами РЛС и шумовыми параметрами окружающей среды. Ввиду большого пространственного разнесения отдельных позиций пространственно-распределённых информационных систем радиотехнического мониторинга (ПРИСРМ) эти помехи носят на каждой позиции случайный характер и являются пространственно некоррелированными.

2. Информационные характеристики ПРИСРМ

Оценка информативных характеристик ПРИСРМ в отсутствие мешающих источников излучения электромагнитных волн производится путем согласованной обработки. Сущность ее заключается в следующем. Отраженный от цели пространственно-временной сигнал зависит от параметров a , которые будем называть истинными. Для согласованной обработки формируют ожидаемый сигнал с ожидаемыми параметрами a_n . Эффективность обработки сигналов с учетом геометрии ПРИСРМ и параметров зондирующего сигнала можно оценить путем вычисления пространственно-временной автокорреляционной функции (ПВАКФ) по параметрам рассогласования $a-a_n$. Пространственно-временная корреляционная функция позволяет оценить потенциальные точности измерения координат целей, разрешающую способность системы и учитывается в алгоритмах обнаружения и измерения ПРИСРМ.

Эффекты рассогласования параметров ожидаемого и принимаемого сигналов в ПРИСРМ учитываются ПВАКФ. Рассмотрим пространственно-временную автокорреляционную функцию для когерентных по пространству и времени сигналов.

Рассогласование по параметрам сигналов условимся оценивать по выходному эффекту [1]

$$\rho(a_c, a) \equiv \left| \int_{-\infty}^{+\infty} X^T(t, a_c) X^*(t, a) dt \right| \quad (1)$$

устройства обработки, согласованного с ожидаемым пространственно-временным сигналом $X(t, a)$ в предположении стационарности, отсутствия корреляции шумов и одинаковой их спектральной плотности N_0 в каналах приема. Выходной эффект находится для случая, когда на вход устройства подается сигнал $Y(t) = X(t, a_c)$ в отсутствии какой-либо помехи и с рассогласованным значением параметра a_c сигнала ($a_c \neq a$). Определенную таким образом функцию $\rho(a_c, a)$ назовем пространственно-временной автокорреляционной функцией сигнала в ПРИСРМ.

Наряду с $\rho(a_c, a)$ вводится нормированная пространственно-временная АКФ:

$$\rho_n(a_c, a) = \frac{\rho(a_c, a)}{(\rho(a_c, a_c)\rho(a, a))^{1/2}}. \quad (2)$$

В знаменатель (2) входят значения функции $\rho(a_c, a_c)$, $\rho(a, a)$, в общем случае различающиеся между собой. Каждое значение $\rho_n(a_c, a)$ характеризует нормированное сигнальное напряжение на выходе устройства оптимальной обработки при рассогласовании параметров a_c и a ; для $a_c = a$ значение $\rho_n(a_c, a) = 1$. Особенностью нормировки (2) является симметрия по отношению к значениям $\rho(a_c, a_c)$ и $\rho(a, a)$, которые могут различаться в некоторых случаях.

Если справедливо соотношение $X(t, a) = X(t, a_{sp}) X(a_{yn})$, при выполнении которого пространственно-временная обработка разделяется на временную и угло-поляризационную, тогда нормированная пространственно-временная автокорреляционная функция (2) сводится к произведению временной и угло-поляризационной нормированных автокорреляционных функций

$$\rho(a_c, a) = \rho_{sp}(a_c, a) \rho_{yn}(a_c, a), \quad (3)$$

индексы вида обработки (угло-поляризационная -*yn*, временная -*sp*) при значениях a опущены. Напомним, что разделение обработки имеет место, если запаздывание комплексной огибающей на совокупном раскрыве антенной системы много меньше $1/\Pi$, где Π – полоса частот сигнала. При использовании сверхширокополосных сигналов в ПРИСРМ это условие практически всегда не выполняется.

Таким образом, для многопозиционных РЛС необходимо рассматривать пространственно-временную АКФ без ее разделения на пространственную и временную. В этом случае вектор пространственно-временного сигнала в комплексном представлении

$$X(t, x, y, z) = \left[a_i(t) \exp(j(2\pi/\lambda)r_i - (\omega_o + \omega_d)t + \phi_n) \right] \quad (4)$$

можем записать в зависимости только от времени с учетом того, что число приемных позиций конечно, а каждая компонента вектора является сигналом в соответствующей приемной позиции с соответствующим временем запаздывания. В этом случае сигнал представим в виде

$$X(t - t_{zi}) = \left[a_i(t) \exp(-j(2\pi(f_o + f_{di}))(t - t_{zi}) + \varphi_{ni}) \right], \quad (5)$$

где $a_i(t)$ – комплексная амплитуда сигнала в i -й позиции,

f_o – несущая частота сигнала,

f_{di} – доплеровская частота сигнала в i -й позиции,

t_{zi} – время запаздывания сигнала в i -й позиции,

φ_{ni} – начальная фаза сигнала в i -й позиции.

Для такого представления пространственно-временного сигнала автокорреляционная функция может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \rho(a_c, a) &\equiv \left| \int_{-\infty}^{+\infty} X^T(t, a_c) X^*(t, a) dt \right| = \left| \sum_i \int_{-\infty}^{+\infty} X_i^T(t, a_{ci}) X^*(t, a_i) dt \right| = \\ &= \left| \sum_i \int_{-\infty}^{+\infty} a_i(t-t_{ci}) a_{0i}(t-t_{0i}) \exp(-j(2\pi(f_o + f_{di})(t-t_{zi}) - 2\pi(f_o + f_{d0i})(t-t_{z0i}))) dt \right|. \end{aligned} \quad (6)$$

Проведем замену переменных в каждом из слагаемых и введем обозначения $s_i = (t - t_{ci})$, $\tau_i = (t_{z0i} - t_{ci})$, $F_i = (f_{di} - f_{d0i})$, где τ_i и F_i – разности между ожидаемыми и истинными значениями времени запаздывания и доплеровских частот в i -й позиции. После преобразования (6) к комплексной огибающей получим

$$\begin{aligned} \rho(a_c, a) &= \rho(\tau, F) = \\ &= \left| \sum_i \int_{-\infty}^{+\infty} a_i(s_i) a_{0i}(s_i - \tau_i) \exp(-j(2\pi F_i s_i - 2\pi F_i - 2\pi f_o \tau_i)) ds_i \exp(2\pi f_o \tau_i) \right| = \\ &= \left| \sum_i \rho(\tau_i, F_i) \exp(-j2\pi f_o \tau_i) \right|. \end{aligned} \quad (7)$$

Каждое из слагаемых в этом выражении представляет собой время-частотную автокорреляционную функцию в i -й позиции.

При точно известных запаздываниях между позициями выражение (7) формально совпадает с время-частотной АКФ когерентной пачки сигналов. В общем случае такая пачка должна иметь неравные интервалы между импульсами. В определенном смысле АКФ пачки когерентных импульсов с одинаковыми межимпульсными интервалами соответствует АКФ сигналов ПРИСРМ с эквидистантно расположенными позициями.

Однако количество пиков пространственно-временной АКФ в ПРИСРМ равно суммарному количеству комбинаций позиций $\sum_i c_N^i$, что обусловлено особенностями обнаружения в

ПРИСРМ и в общем случае больше чем в АКФ пачки когерентных сигналов. Интервалы между пиками будут изменяться в соответствии с изменениями Δt_{zij} , которое играет роль периода. В пространстве пики АКФ располагаются в общем случае неэквидистантно.

Основное существенное отличие пространственно-временной АКФ в ПРИСРМ от АКФ когерентной пачки заключается в том, что при согласованной (оптимальной) обработке необходимо учитывать фазовые множители $\exp(-j2\pi f_o \tau_i)$.

При когерентной обработке временного сигнала значения задержек и доплеровской частоты практически одинаковы для всей пачки сигналов. Поэтому обработка комплексной огибающей пачки эквивалентна обработке пачки на радиочастоте, так как существует взаимно-однозначное преобразование (умножение на $\exp(\pm j\omega_0(t-t_z))$). В случае приёма сигналов в ПРИСРМ такое преобразование не осуществимо из-за различий τ_i и F_i в каждой из позиций.

При вычислении АКФ когерентной пачки фазовый множитель $\exp(-j2\pi f_o \tau_i)$ можно вынести за знак модуля, что позволяет не учитывать его при обнаружении когерентного сигнала с общей неизвестной начальной фазой.

Таким образом, пространственно-временная автокорреляционная функция может вычисляться как сумма АКФ сигналов в позициях, взвешенных на фазовый множитель. Следует учесть, что параметры рассогласования (их зависимость от пространственных координат) зависят от точки пространства, в которую сфокусирована ПРИСРМ. Для каждой точки пространства и фиксированного расположения позиций пространственно-временная АКФ характеризуется различающимися значениями. Однако она может быть пересчитана для любой точки пространства путем преобразования масштаба АКФ по параметрам рассогласования, что позволяет использовать АКФ для оценки качества приема сигналов в ПРИСРМ, а также для определения рациональной геометрии системы.

Подчеркнем, что пространственно-временная АКФ, определяющая разрешающую способность системы и потенциальную точность, должна вычисляться с учетом высокочастотных фазовых множителей, что особенно важно при реализации цифровой обработки сигналов в ПРИСРМ.

3. Особенности когерентной обработки временного пачечного сигнала в ПРИСРМ

Одной из отличительных особенностей приема радиосигналов от приема сигналов оптических систем заключается в том, что радиоприемники позволяют регистрировать сигналы на несущей частоте. В оптике обычно удается измерять только квадраты напряженностей световых полей, усредненные по промежуткам времени, весьма большим не только по сравнению с периодами световых волн, но и по сравнению с временем, в течение которого происходят случайные изменения амплитуд и фаз этих колебаний.

В радиолокации обычно случайные изменения амплитуд и фаз происходят за время, значительно большее, чем длительность отраженного сигнала. Поэтому сигналы в позициях обычно некогерентны, если в передающей позиции используется некогерентная пачка импульсов или длительность пачки такова, что за это время могут измениться условия наблюдения (свойства атмосферы, координаты цели или позиций). В соответствии с [2, 3] эхосигнал от цели, размеры которой намного больше длины волны зондирующего сигнала РЛС, можно рассматривать как результат интерференции сигналов, отраженных от блестящих точек. Даже небольшие изменения пространственного положения цели приводят к значительным изменениям длины путей распространения сигналов от блестящих точек до приемных антенн, а следовательно, и к значительным изменениям фаз сигналов. В результате интерференции в суммарном эхосигнале наблюдаются изменения комплексной амплитуды. В [4] предлагается считать такие изменения случайными флуктуациями. Наиболее часто используется модель флуктуаций с рэлеевским распределением вероятностей действительных амплитуд и равномерным распределением начальных фаз, что соответствует гауссовскому распределению вероятностей комплексных амплитуд с нулевым средним. Эта модель удовлетворительно описывает флуктуации эхосигналов от целей, представимых в виде нескольких близких по интенсивности блестящих точек (БТ). В то же время ясно, что если за время длительности сигнала условия локации не изменились, то сигналы остаются когерентны, но начальные фазы и амплитуды их могут быть неизвестны.

Предположим, что движущаяся цель больших, по сравнению с длиной волны $\lambda = 2\pi c/\omega$, размеров воспринимается всеми позициями ПРИСРМ как одна и та же система жестко закрепленных блестящих точек.

Для простоты рассмотрим произвольные передающую и две приемные позиции. Координаты цели считаем неизменными на анализируемом интервале времени. Расстояния от первой блестящей точки цели до позиций в начальный момент времени – R_0 , R_1 и R_2 .

Рассмотрим случай точечной цели, т.е. в составе цели одна блестящая точка.

В этом случае эхосигнал в i -й позиции запишем в виде

$$X(t) = a_i x(t - t_{zi}) \exp(-j\omega_0(t - t_{zi})),$$

где a_i – комплексная амплитуда отраженного сигнала; $t_{zi} = (R_0 + R_i)/c$; $x(t)$ – нормированный по энергии сигнал, например, к единичной энергии.

Амплитуда $a_i = |a_i|$ и фазовый множитель $\exp(j(\omega_0 t_{zi} + \varphi_i))$ в основном зависят от путей распространения – крупномасштабных и мелкомасштабных неоднородностей атмосферы. При отсутствии амплитудно-фазовых искажений пространственная корреляция сигналов зависит только от длительности во времени анализируемого сигнала. При временном сдвиге сигналов между позициями на длительность сигнала пространственная корреляция становится равной нулю для одного и того же момента времени. Однако не сложно видеть, что если на интервале

анализа временная корреляция сигналов не нарушается, то взаимная корреляция сигналов, принятых позициями, совпадает с время-частотной АКФ зондирующего сигнала. Так, что модуль коэффициента корреляции близок к единице (при отсутствии рассогласования по параметрам сигнала), а сигналы можно считать пространственно-когерентными даже при неизвестных начальных фазах сигналов в позициях.

В этом случае $\rho(\tau) = \rho(\tau - t_{31} + t_{32})$, т.е. максимум функции сдвинут относительно $\tau = 0$ на разность времен запаздывания сигнала между позициями, а с учетом разности начальных фаз максимум может быть дополнительно сдвинут на интервал $\pm \lambda / 2c$. Такой сигнал всегда можно считать пространственно-когерентным, по крайней мере, на интервале длительности сигнала [5–8].

Предположим, что блестящих точек несколько и они не разрешаются по дальности и угловым координатам. Кроме того, считаем, что доплеровский набег фазы за время длительности каждого импульса равен нулю. При этих условиях эхосигнал в i -й позиции запишем в виде

$$X(t) = \sum a_i x(t - t_{3i}) \exp(-j\omega_0(t - t_{3i})). \quad (8)$$

Считаем, что антенны в позициях одноэлементные, что не влияет на ход дальнейших рассуждений.

Элемент матрицы корреляционных функций можем записать в виде

$$\begin{aligned} \Phi_{mk}(\tau) &= \int_0^T X_i^*(t) X_j(t - \tau) dt = \int_0^T \sum \sum a_{im}^* x(t - t_{3i}) \exp(j\omega_0(t - t_{3i})) \times \\ &\times a_{jk} x(t - t_{3jk}) \exp(j\omega_0(t - t_{3jk})) dt = \sum \sum a_i^* a_j \rho_H(\tau - t_{3i} + t_{3j}). \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение (9) при $m \neq k$ характеризует взаимную корреляционную функцию сигналов между позициями. Она минимальна в минимумах диаграммы вторичного излучения, когда эхосигналы от блестящих точек компенсируются, и отлична от нуля при других соотношениях фаз эхосигналов. Таким образом, сигналы можно считать пространственно-коррелированными (с различными значениями коэффициента корреляции) между теми позициями, в которых отраженные от цели сигналы принимаются позициями ПРИСРМ. Изложенное касается пространственной корреляции сигналов на временном интервале анализа сигналов, т.е. пространственная корреляция сигналов не может рассматриваться в отрыве от времени анализа сигналов.

4. Пример когерентной обработки отраженных от цели сигналов в ПРИСРМ

В качестве примера рассмотрим цель, которая может быть представлена пятью блестящими точками. Цель облучается плоским волновым фронтом, параллельным оси X . Приемные позиции располагаются в плоскости на одинаковой дальности от первой блестящей точки в направлениях от вектора на передающую позицию через 15 град (первая приемная позиция совмещена с передающей).

Цель, представленная такой системой блестящих точек, показана на рис. 1.

Координаты блестящих точек заданы в метрах в системе координат, начало которой совпадает с первой блестящей точкой, и их значения равны БТ₁ = [0,0]; БТ₂ = [10,10]; БТ₃ = [30,15]; БТ₄ = [-10,25]; БТ₅ = [50,50].

Амплитуды сигналов, отраженных блестящими точками, равны 10 для всех точек.

Начальные фазы сигналов от каждой БТ неизвестны и заданы случайными числами, распределенными по нормальному закону. Сигналы принимаются позициями на дальности 100 км от БТ₁ через 15 град. Суммарный сигнал (от БТ) представлен на рис. 3.

Для оценки когерентности сигналов вычислялась взаимокорреляционная функция (ВКФ) суммарного сигнала (рис. 2а), отраженного в направлении, обратном от направления облучения цели, и сигнала (рис. 2б–г), принятого в одной из приемных позиций. Соответствующие ВКФ представлены на рис. 3.

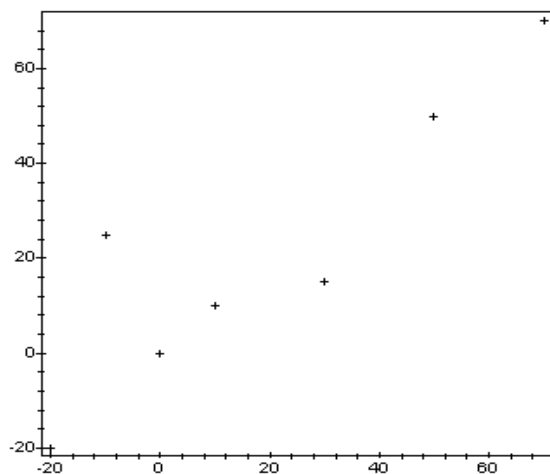


Рис. 1. Система блестящих точек цели

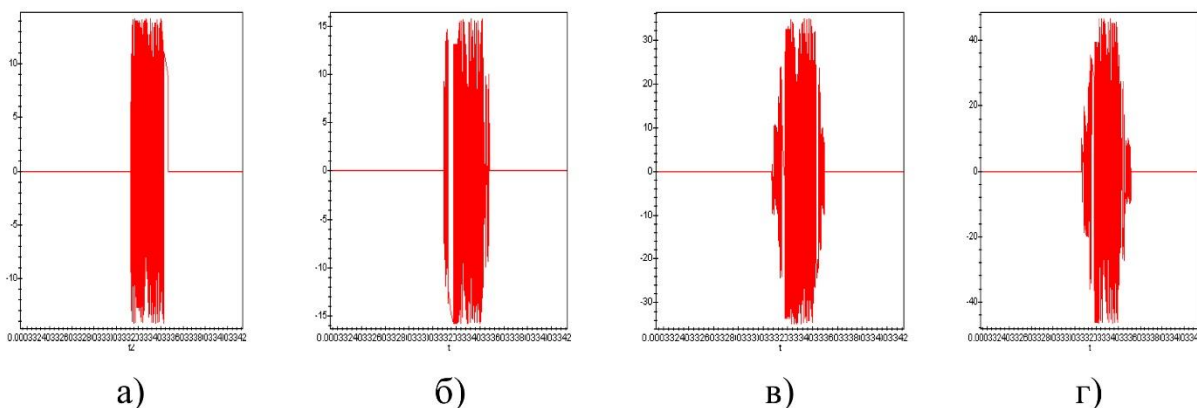


Рис. 2. а) сигнал от цели, зарегистрированный первой приемной позицией; б) сигнал от цели, зарегистрированный второй приемной позицией; в) сигнал от цели, зарегистрированный третьей приемной позицией; г) сигнал от цели, зарегистрированный четвертой приемной позицией

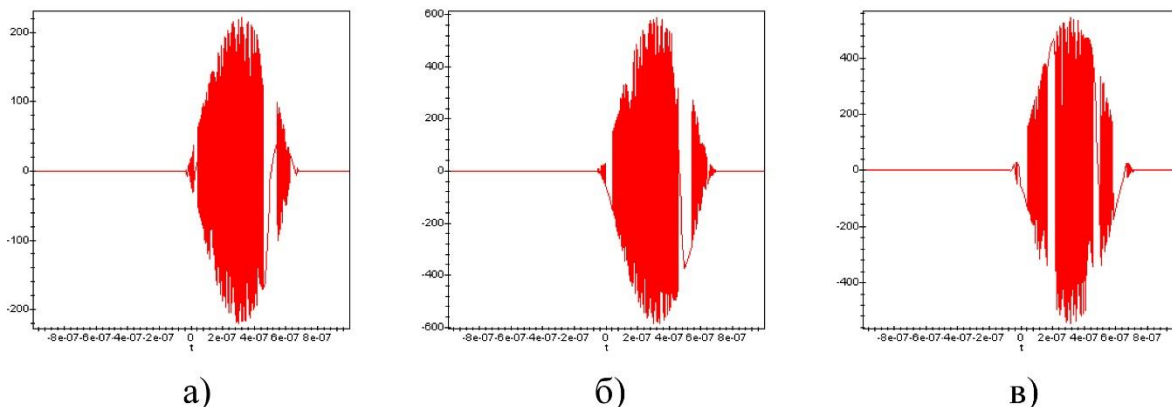


Рис. 3. а) взаимокорреляционная функция сигнала в первой и второй позициях; б) взаимокорреляционная функция сигнала в первой и третьей позициях; в) взаимокорреляционная функция сигналов в первой и четвертой позициях

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в случае сохранения временной когерентности сигналов в позициях всегда существует и пространственная когерентность сигналов, конечно с учетом особенностей вторичного излучения целей. В случае, когда начальные фазы неизвестны, когерентный прием может быть осуществлен путем вычисления отношения правдоподобия в этих условиях. Синтез алгоритмов приема и оценка характеристик такого приема требуют дополнительных исследований.

5. Заключение

Введена пространственно-временная автокорреляционная функция, которая может вычисляться как сумма АКФ сигналов в позициях, взвешенных на фазовый множитель, и определяющая разрешающую способность радиотехнической системы и её потенциальную точность. Приведена оценка когерентности сигналов для цели, представленной пятью блестящими точками, на основе вычисления взаимокорреляционных функций сигналов выбранных пар позиций. АКФ может быть использована для оценки качества приема сигналов в ПРИСРМ, а также для определения рациональной геометрии системы.

Литература

1. *Бартон Д., Вард Г.* Справочник по радиолокационным измерениям: пер. с англ. / Под ред. М. М. Вейсбейна. М.: Сов. радио, 1976. 392 с.
2. *Репин В. Г., Тартаковский Г. П.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М., 1977. 432 с.
3. *Черемисов А. К.* Статистические характеристики эффективной площади рассеяния тела в бистатической радиолокации // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32, № 12. С. 2516–2524.
4. *Бакулев П. А., Степин В. М.* Методы и устройства селекции движущихся целей. М.: Радио и связь, 1986. 288 с.
5. *Абрамович Ю. И.* Регуляризованный метод адаптивной оптимизации фильтров по критерию максимума отношения сигнал/помеха // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 26, № 3. С. 543–551.
6. *Чернов Д. А.* Синхронизация времени в пространственно разнесенной аппаратуре с помощью сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 3 (23). С. 62–67.
7. *Ташлинский А. Г., Царёв М. Г.* Псевдоградиентное оценивание временного сдвига сигналов разнесенных приемников с использованием ПЛИС // Автоматизация процессов управления. 2016. № 2 (44). С. 93–99.
8. *Горбунов Ю. Н., Акопян Г. Л.* Пространственно-временная обработка сигналов в радиолокации и радиоэлектронном подавлении: ограничение возможностей // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/15/text.pdf>.

Статья поступила в редакцию 28.07.2020.

Полубехин Александр Иванович

к.т.н., руководитель Инновационного технологического центра комплекса научной политики МГТУ им. Н. Э. Баумана, тел. (499) 263-68-46, e-mail: polub1980@mail.ru.

Spatial and temporal coherence of signals in a spatially distributed information system of radar modules

A. I. Polubekhin

The main characteristics of spatially distributed information systems of radio engineering monitoring (PRISRM) (space-time autocorrelation function (PVACF), angle-polarized normalized autocorrelation function, time-frequency ACF and time coherence of signals in positions). The features of coherent processing of a temporary batch signal for which the delay and Doppler frequency values are almost identical for the entire batch of signals are revealed.

Keywords: distributed information system of radio engineering monitoring, radar system, autocorrelation function, batch signal, interference.