

УДК 621.391

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ФИЛЬТР, ПОДАВЛЯЮЩИЙ ОДНОЛУЧЕВУЮ ПОМЕХУ

Ю. В. Березин, Ю. Е. Виноградов, Н. В. Потапова

Исследованы основные особенности качества работы пространственного фильтра (ПФ), подавляющего однолучевую частично рассеянную помеху. Показано, что как при наличии, так и при отсутствии взаимной корреляции между сигналом и помехой эффективность работы ПФ существенно зависит от выбора его геометрических параметров. Проведенный эксперимент при вертикальном зондировании ионосферы подтвердил основные выводы анализа. На основе результатов работы даны рекомендации для практического использования ПФ.

Возможность улучшения помехоустойчивости приема на линиях связи, использующих радиоволны, определяется пространственно-временными свойствами последних. Для повышения помехоустойчивости приема используются, в частности, адаптивные антенные решетки, именуемые далее пространственными фильтрами (ПФ). Работы, посвященные анализу работы ПФ, затрагивают, в основном, способы получения оптимальных весовых коэффициентов и не касаются исследования зависимости качественных показателей функционирования, уже оптимизированного по некоторому критерию ПФ от характеристик принимаемых полей [1].

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование возможности максимизации отношения сигнал/помеха с помощью двухэлементного ПФ, обрабатывающего коррелированные сигнал и помеху, путем выбора его оптимальной геометрии.

Рассмотрим две антенны, разнесенные в пространстве на расстояния x и объединенные в один ПФ с помощью схемы управления весовым коэффициентом ω и сумматора. Пусть на ПФ под произвольными углами $\bar{\theta}_c$ и $\bar{\theta}_n$ падают однолучевые сигнал и помеха одной частоты. Угол $\bar{\theta}$ образован волновым вектором \mathbf{k} и линией, соединяющей антенны ПФ, и отсчитан от нее. Допустим, что сигнал и помеха — узкополосные, стационарные, эргодические случайные процессы, рассеянные части которых характеризуются гауссовыми угловыми спектрами; кроме сигнала и помехи присутствует также широкополосный некоррелированный шум. Выходной сигнал ПФ имеет вид

$$u(t) = u_c(t) + u_n(t) + u_\xi(t),$$

где

$$\begin{aligned} u_c(t) &= c_1(t)\omega + c_2(t), \\ u_n(t) &= n_1(t)\omega + n_2(t), \\ u_\xi(t) &= \xi_1(t)\omega + \xi_2(t), \end{aligned} \quad (1)$$

$c_{1,2}$, $n_{1,2}$ и $\xi_{1,2}$ — напряжение сигнала, помехи и шума соответственно на нагрузке первой и второй антенн.

В соответствии с (1) средняя мощность на выходе ПФ равна

$$P = P_{c \text{ вых}} + P_{n \text{ вых}} + P_{\xi \text{ вых}} + P_l, \quad (2)$$

где

$$P_{c \text{ вых}} = \langle |u_c(t)|^2 \rangle, \quad P_{n \text{ вых}} = \langle |u_n(t)|^2 \rangle, \\ P_{\xi \text{ вых}} = \langle |u_{\xi}(t)|^2 \rangle, \quad P_1 = 2 \operatorname{Re} \langle u_c(t) u_n^*(t) \rangle.$$

Исходя из требования минимума величины $P_M = P_{n \text{ вых}} + P_{\xi \text{ вых}} + P_1$ по переменной ω , легко получить значение весового коэффициента, при котором на выходе ПФ обеспечивается минимум мощности помехи, шума, а также мощности, соответствующей ковариации сигнала и помехи

$$\omega_{\text{opt}} = - \frac{\dot{R}_n^* + 2\rho_{c.n} \operatorname{Re}(\dot{D}_{c.n})}{1 + \rho_{\xi n} + 2\rho_{c.n} \operatorname{Re}(\dot{F}_{c.n})}, \quad (3)$$

где

$$\dot{R}_n = \langle n_1(t) n_2^*(t) \rangle / P_n, \\ \rho_{c.n.} = (P_c / P_n)^{1/2}, \quad \rho_{\xi n} = P_{\xi} / P_n, \\ \dot{D}_{c.n} = \langle c_1(t) n_2^*(t) \rangle / (P_c P_n)^{1/2}, \\ \dot{F}_{c.n} = \langle c_1(t) n_1^*(t) \rangle / (P_c P_n)^{1/2}$$

и P_c , P_n , P_{ξ} — мощности сигнала, помехи и шума на антенном элементе.

Качество работы ПФ можно характеризовать параметром $\mu = \text{ОСП}_{\text{вых}} / \text{ОСП}_{\text{вх}}$ (эффективность работы ПФ), где $\text{ОСП}_{\text{вых}}$ и $\text{ОСП}_{\text{вх}}$ — отношение сигнал/(помеха + шум) на выходе ПФ и на антенном элементе. Легко показать, что в условиях рассматриваемой задачи

$$\mu = \frac{1 + |\omega|^2 + 2 \operatorname{Re}(\dot{R}_c \omega)}{1 + |\omega|^2 + 2 \operatorname{Re}(\dot{R}_n \omega) / (1 + \rho_{\xi n})}, \quad (4)$$

где $\dot{R}_c = \langle c_1(t) c_2^*(t) \rangle / P_c$. Таким образом, при $\omega = \omega_{\text{opt}}$ формулы (3) и (4) определяют качество работы ПФ, оптимизированного по критерию $P_M = P_{\text{min}}$. Из (4) следует, что качество работы ПФ зависит от различных параметров, характеризующих статистические и пространственные свойства сигнала и помехи, а также аддитивный шум. Пространственные характеристики сигнала и помехи (в частности, пространственные корреляционные функции) не являются инвариантами относительно выбранной системы координат, и поэтому возникает задача оптимизации геометрических параметров ПФ. Геометрическими параметрами ПФ являются относительное расстояние $d = x/\lambda$ (λ — длина волны сигнала и помехи), а также средние значения углов прихода сигнала $\bar{\Theta}_c$ и помехи $\bar{\Theta}_n$. Задачу оптимизации геометрических параметров ПФ сформулируем следующим образом: при заданном уровне шума и характеристиках рассеяния сигнала и помехи исследовать зависимость эффективности работы ПФ (оптимизированного по критерию $P_M = P_{\text{min}}$) от расстояния d и углов прихода $\bar{\Theta}_c$, $\bar{\Theta}_n$, а также определить сочетание параметров $\bar{\Theta}_c$, $\bar{\Theta}_n$ и d , при которых $\mu = \mu_{\text{max}}$. Известно [2], что коэффициент пространственной корреляции частично рассеянного поля сигнала или помехи имеет вид

$$\dot{R} = (R + \beta^2) (1 + \beta^2)^{-1} \exp(i\varphi), \quad (5)$$

где $R = \exp[-2(\pi d \Theta_0 \sin \bar{\Theta})^2]$ — модуль комплексного коэффициента пространственной корреляции рассеянной части поля (Θ_0 — ширина углового спектра), β^2 — параметр рассеяния, равный отношению мощности детерминированной составляющей поля к средней мощности его рас-

сеянной компоненты, $\varphi = 2\pi d \cos \bar{\Theta}$ — разность фаз сигнала или помехи на двух антеннах. Подставляя (3) и (5) в (4), получим аналитическое выражение, из которого следует, что

$$\mu = f(\bar{\Theta}_c, \bar{\Theta}_n, d, \Theta_{0c}, \Theta_{0n}, \beta_c^2, \beta_n^2, D_{c.n}, \dot{F}_{c.n}, \rho_{c.n}, \rho_{\xi n}). \quad (6)$$

Анализ функции (6) проведен в предположении, что $\Theta_{0c} = \Theta_{0n} = \Theta_0$ и $\beta_c^2 = \beta_n^2 = \beta^2$ численным методом для двух случаев:

- 1) $\dot{F}_{c.n} = \dot{D}_{c.n} \equiv 0$;
- 2) $\dot{F}_{c.n} \neq 0, \dot{D}_{c.n} \neq 0$.

Результаты анализа для случая $\dot{F}_{c.n} = \dot{D}_{c.n} = 0$ представлены на рис. 1, 2, 3. На рис. 1 изображено семейство функций $\mu = f(d)$ по параметру $\bar{\Theta}_c$ при $\bar{\Theta}_n = 90^\circ$, а на рис. 2 — аналогичное семейство по параметру $\bar{\Theta}_n$ при $\bar{\Theta}_c = 90^\circ$ ($\Theta_0 = 4^\circ, \beta^2 = 4, \rho_{\xi n} = 0,01$ и $\rho_{c.n} = 1$). Особенностью функции $\mu = f(d)$ являются ее осцилляции с убывающей амплитудой. Для типичных характеристик рассеяния радиоволн, распространяющихся в ионосферном канале связи, основной максимум $\mu = f(d)$ соответствует значению $0,3 \leq d \leq 1$ (при $\bar{\Theta}_c$ и $\bar{\Theta}_n$, лежащих в пределах 5—80°). Расчеты показали, что для случая $\bar{\Theta}_n = 90^\circ$ при уменьшении ширины углового спектра Θ_0 величина максимума μ увеличивается на 60—70 единиц при всех значениях $\bar{\Theta}_c$.

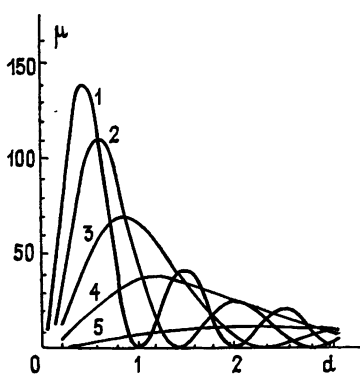


Рис. 1.

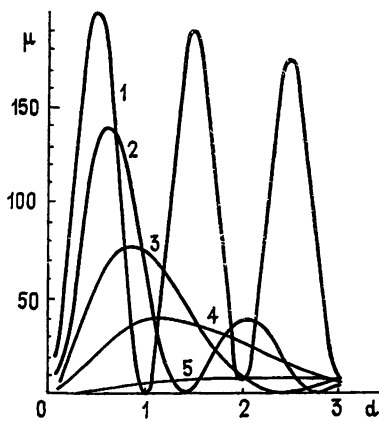


Рис. 2.

Семейство функций $\mu = f(\bar{\Theta}_n)$ по параметру $\bar{\Theta}_c$ (при $d = 0,6, \rho = 0,01, \beta^2 = 4, \Theta_0 = 4^\circ$) представлено на рис. 3 (кривая 1—15°, 2—30°, 3—45°, 4—60°). Видно, что независимо от значения $\bar{\Theta}_c$ максимум $\mu = f(\bar{\Theta}_n)$ имеет место при $80^\circ \leq \bar{\Theta}_n \leq 110^\circ$, причем его величина практически не зависит от $\bar{\Theta}_c$.

Расчеты показали также, что величина относительного уровня атмосферного шума существенно влияет на качество работы ПФ — при уменьшении $\rho_{\xi n}$ на порядок величина μ возрастает в 50—100 раз.

Полосу пространственных частот, эффективно обрабатываемых ПФ, можно характеризовать числом

$$\Delta_k = \Delta k / k_{opt} = \Delta d / d_{opt},$$

где d_{opt} — значение d , при котором μ достигает максимума; $\Delta d = d_2 - d_1$; $d_{1,2}$ — значения d , при которых $\mu = 0,5 \mu_{max}$. При $5^\circ \leq \bar{\Theta}_c \leq 65^\circ$ $1,1 \leq$

$\ll \Delta_k \leq 1,3$, т. е. полоса пространственных частот помех, эффективно подавляемых ПФ, весьма широка. Сигнал и помеха не всегда могут быть некоррелированы. При распространении радиоволн в некоторых каналах связи возникает несколько коррелированных мод, различающихся своими характеристиками. Типичным примером является ионосферный канал. В этом случае интерференция между различными модами существенно снижает помехоустойчивость приема сообщений.

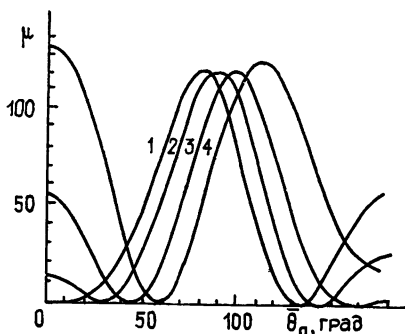


Рис. 3.

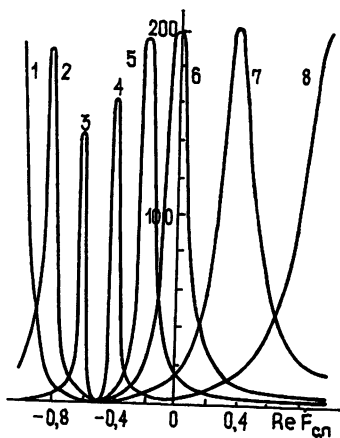


Рис. 4.

Рассмотрим эффективность работы ПФ в случае подавления одной мешающей моды (помехи), коррелированной с другой модой (сигналом). Результаты анализа для случая $\dot{F}_{c.π} \neq 0$, $\dot{D}_{c.π} \neq 0$ представлены на рис. 4, 5. На этих рисунках изображены семейства функций $\mu = f(\text{Re } \dot{F}_{c.π})$ по параметру $\text{Re } \dot{D}_{c.π}$ при фиксированных значениях $\Theta_{oc} = \Theta_{on} = 4^\circ$, $\beta_c^2 = \beta_\pi^2 = 4$, $\rho_{c.π} = 1$, $\rho_{\xi.π} = 0,01$, $d = 0,5$ для двух сочетаний углов прихода сигнала и помехи (рис. 4 $\bar{\Theta}_c = 90^\circ$, $\bar{\Theta}_\pi = 5^\circ$, кривая 1 — $\text{Re } \dot{D}_{c.π} = 1,0$, 2 — 0,8, 3 — 0,6, 4 — 0,4, 5 — 0,2, 6 — 0, 7 — (-0,4), 8 — (-1,0); рис. 5 $\bar{\Theta}_\pi = 90^\circ$, $\bar{\Theta}_c = 5^\circ$, кривая 1 — $\text{Re } \dot{D}_{c.π} = 1,0$, 2 — 0,7, 3 — 0, 4 — (-0,4), 5 — (-0,6), 6 — (-0,8), 7 — (-1,0)). Видно, что μ является сложной функцией своего аргумента. Отметим основные особенности эффективности работы ПФ в этом случае. При заданном значении $\text{Re } \dot{D}_{c.π}$ функция $\mu = f(\text{Re } \dot{F}_{c.π})$ немонотонна, причем экстремум соответствует равенству $|\text{Re } \dot{F}_{c.π}| = |\text{Re } \dot{D}_{c.π}|$.

Величина экстремума практически не зависит от значения $\text{Re } \dot{F}_{c.π}$, исключение составляет область значений $\text{Re } \dot{F}_{c.π} \approx -0,5$.

Вблизи экстремума функция $\mu = f(\text{Re } \dot{F}_{c.π})$ очень быстро убывает при изменении аргумента в ту или другую сторону от значения $\text{Re } \dot{F}_{c.π} = \text{Re } \dot{D}_{c.π}$, причем в области отрицательных значений $\text{Re } \dot{F}_{c.π}$ эта особенность выражена более сильно.

Таким образом, эффективность работы ПФ существенно зависит от особенностей действительных частей пространственных авто- и взаимно-корреляционных функций полей сигнала и помехи. Для ПФ в совпадающие моменты времени всегда имеет место неравенство $|\text{Re } \dot{D}_{c.π}| < |\text{Re } \dot{F}_{c.π}|$, и в этих условиях значение μ может быть существенно меньше экстремального, что хорошо иллюстрируется графиками рис. 4 и 5.

Из результатов анализа качества работы двухэлементного ПФ при наличии или отсутствии корреляции между сигналом и помехой следует, что:

1) Существует оптимальное расстояние между антеннами ПФ — d_{opt} , при котором эффективность работы ПФ μ достигает максимума. Величина максимума и значение d_{opt} зависят от абсолютных значений $\bar{\Theta}_c$ и $\bar{\Theta}_n$, их разности, а также от характеристик рассеяния полей сигнала и помехи и от относительного уровня шума.

2) В условиях априорной неопределенности углов прихода сигнала и помехи нельзя указать точно величину d_{opt} , при которой ПФ всегда обеспечивает максимальный выигрыш в ОСП. Максимум эффективности работы ПФ может быть достигнут только в том случае, если его геометрия оптимизирована по двум параметрам — величине d и ориентации базовой линии ПФ относительно углов прихода сигнала и помехи. При оптимальном выборе геометрии ПФ значение μ достигает 200 единиц в условиях, характерных для ионосферного канала связи. Уменьшение ширины углового спектра сигнала или помехи приводит к увеличению μ ; увеличение уровня аддитивного шума уменьшает μ .

3) При отсутствии взаимной пространственной корреляции полей сигнала и помехи перпендикулярная ориентация базовой линии ПФ относительно плоскости распространения сигнала или помехи предпочтительнее произвольной.

4) Относительная ширина полосы пространственных частот, эффективно подавляемых ПФ с оптимизированной геометрией, порядка единицы.

5) Наличие корреляции между сигналом и помехой осложняет работу ПФ; эффективность его работы становится функцией действительных частей авто- и взаимно-корреляционных пространственных функций сигнала и помехи и, как правило, ниже, чем в случае $\text{Re } F_{c, \pi} = \text{Re } D_{c, \pi} \equiv 0$.

Проверка всех развитых представлений об эффективности работы двухэлементного ПФ с оптимизированным весовым коэффициентом в реальном эксперименте затруднительна по целому ряду причин, тем не менее возможна проверка отдельных функциональных зависимостей.

С целью исследования зависимости эффективности работы ПФ от размера его базы был проведен следующий эксперимент.

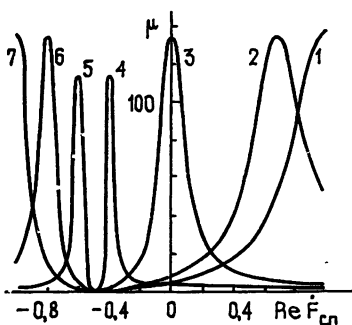


Рис. 5.

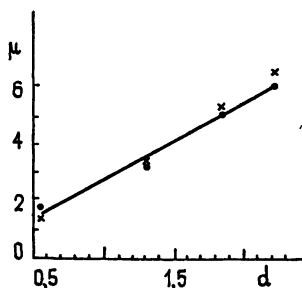


Рис. 6.

Передатчик с помощью антенны с вертикальной диаграммой направленности излучал импульсы длительностью 100 мкс в декаметровом диапазоне радиоволн. Рабочая частота передатчика выбиралась в области полного разделения группового запаздывания магнитоионных компонент отраженной от ионосферы волны. Это обстоятельство позволяло рассматривать две магнитоионные компоненты как однолучевые частично рассеянные сигнал и помеху, идущие под разными углами. Аппаратура когерентного приема и система пространственно-разнесенных антенн позволяли получить информацию, необходимую для опре-

деления эффективности работы двухэлементного ПФ и построения функции $\mu=f(d)$ (в ограниченной области изменения аргумента d и при ограниченных значениях других параметров задачи).

На рис. 6 представлена полученная экспериментально усредненная зависимость эффективности работы ПФ от величины его базы при подавлении одной из магнитоионных компонент отраженной от ионосферы волны (прямая, построенная по методу наименьших квадратов). Видно, что эффективность работы ПФ линейно возрастает от значения $\mu=2$ при $d=0,5$ до значения $\mu=6$ при $d=2$. Максимальное значение μ , которое было получено в эксперименте, равнялось девяти. Значения μ относительно невелики, так как различие углов прихода сигнала и помехи было незначительным ($\approx 2^\circ$) при следующем сочетании этих углов: $87,5 \leq \Theta_c \leq 88,5$ и $89^\circ \leq \Theta_n \leq 91^\circ$. На этом же рисунке представлены результаты теоретических вычислений $\mu=f(d)$ (крестики), проведенных на основе экспериментальных оценок статистических и пространственных характеристик сигнала и помехи. Видно, что результаты этих вычислений вполне удовлетворительно совпадают с результатами эксперимента.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что пространственный фильтр с базой $d=(0,3-3)\lambda$ не эффективен для разделения двух магнитоионных компонент отраженной от ионосферы волны вследствие малого различия их углов прихода. ПФ начинает эффективно работать, если значение разности углов прихода сигнала и помехи превышает пять-шесть градусов, т. е. такой пространственный фильтр способен хорошо разделять различные моды, возникающие в ионосферном канале связи и сильно снижающие помехоустойчивость приема сигналов. Выявленные особенности работы ПФ необходимо учитывать при его практическом использовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гейбриэл В. Ф.— ТИИЭР, 1976, 64, № 2, с. 55.
2. Брамли Е. Н.— Проблемы современной физики, 1952, № 12, с. 82.

Московский государственный
университет

Поступила в редакцию
14 декабря 1981 г.

A SPACE FILTER SUPPRESSING ONE-RAY NOISE

Yu. V. Berezin, Yu. E. Vinogradov, N. V. Potapova

Basic peculiarities are investigated of a space filter (SF) quality of operation which suppresses one-ray partially scattered noise. It is shown that both in the presence and in the absence of mutual correlation between the signal and the noise the efficiency of the operation of the space filter depends essentially on the choice of its geometrical parameters. An experiment on the vertical censuring of the ionosphere confirms the basic conclusions of the analysis. Based on the results of the paper recommendations are given for the use of the space filter in practice.