

УДК 621.391:621.396

И.В. Чекед, С.П. Волковецкий

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОЙ И КВАЗИОПТИМАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШУМОВОГО СИГНАЛА ПРИ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХАХ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ АНТЕННЫ АВИАЦИОННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

На основе ранее разработанных подходов к оптимизации пространственно-временной обработки при сложном движении антенны авиационных гидроакустических станций в пространстве синтезирован ряд алгоритмов пространственно-временной обработки шумового сигнала на фоне коррелированных гауссовских помех. Рассмотрен сигнал, состоящий из дискретных составляющих и сплошной части спектра.

При оптимизации пространственно-временной обработки (ПВО) сигнала обычно полагают, что приемная антенна авиационных гидроакустических станций (ГАС) неподвижна, а полезный сигнал принимается на фоне помехи. В реальной обстановке антенны, устанавливаемые на подвижных авиационных носителях (вертолетах и самолетах), подвержены сложным линейным и угловым перемещениям. Как показали исследования [1] – [13], такое сложное движение антенны в пространстве часто играет не отрицательную роль, как считалось ранее, а явно положительную. Вследствие такого движения во многих случаях оказывается возможным значительно улучшить основные параметры систем ПВО: повысить частотно-угловую избирательность и помехоустойчивость.

В работах [1] – [13] использовались достаточно простые модели квазидетерминированных и шумовых сигналов. В интересах дальнейшего повышения потенциала систем ПВО, работающих в условиях движения, целесообразно использование более адекватных моделей сигнала. Реальные шумовые поля, порождаемые движущимися объектами локации, имеют многокомпонентную структуру. Часто их спектр содержит квазидетерминированные дискретные составляющие и случайную составляющую. Эта особенность должна учитываться при ПВО сигнала.

Целью настоящей статьи является синтез для подвижных антенн авиационных ГАС оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов ПВО шумовых гидроакустических сигналов, имеющих многокомпонентную структуру, на фоне коррелированных помех. Основой решения этой задачи являются подходы, разработанные в работах [3], [4], [14].

Рассмотрим модель шумового гауссовского сигнала, детально описанную в работе [14]. Принимаемый сигнал $s(t, \vec{x}, \vec{\lambda})$ может быть записан в комплексном виде следующим образом:

$$s(t, \vec{x}, \vec{\lambda}) = s_0(t, \vec{x}, \vec{\lambda}_x) + s_d(t, \vec{x}, \vec{\lambda}).$$

При стационарном сигнале его корреляционная функция имеет вид:

$$\begin{aligned} K_S(t_4 - t_3, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{\lambda}) &= \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g_S(f) G_S^*(f, \bar{x}_3, \bar{\lambda}_x) G_S(f, \bar{x}_4, \bar{\lambda}_x) \exp(j2\pi f(t_4 - t_3)) df + \\ &+ \sum_{n=1}^N a_n^2 G_S^*(f_n, \bar{x}_3, \bar{\lambda}_x) G_S(f_n, \bar{x}_4, \bar{\lambda}_x) \exp(j2\pi f(t_4 - t_3)), \end{aligned} \quad (1)$$

где $g_S(f)$ – спектральная плотность мощности сплошной части спектра сигнала; $G_S(f, \bar{x}, \bar{\lambda}_x)$ – функция Грина, учитывающая особенности среды распространения колебаний; a_n – амплитуда n -й дискретной компоненты сигнала; j – мнимая единица.

В случае, когда сигнал представляет собой плоскую волну, функция Грина

$$G_S(f, \bar{x}, \bar{\lambda}_x) = \exp(-j2\pi f \bar{n}_S \bar{x}),$$

где $\bar{n}_S = \frac{1}{c}(\cos \varphi \sin \vartheta, \sin \varphi \sin \vartheta, \cos \vartheta)$ – вектор, характеризующий направление прихода сигнала; c – скорость распространения звука в среде.

При этом корреляционная функция (1) может быть представлена как

$$\begin{aligned} K_S(t_2 - t_1, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{n}_S) &= \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g_S(f) \exp(-j2\pi f(t_2 - t_1)) \exp(j2\pi f \bar{n}_S(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)) df + \\ &+ \sum_{n=1}^N a_n^2 \exp(-j2\pi f_n(t_2 - t_1)) \exp(j2\pi f_n \bar{n}_S(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)). \end{aligned}$$

Следуя методике, описанной в работе [14], рассмотрим задачу синтеза оптимального по критерию максимума отношения правдоподобия алгоритма ПВО шумового сигнала. Будем считать, что помеха – гауссовская, имеет нулевое математическое ожидание и характеризуется корреляционной функцией $K_N(t_1, t_2, \bar{x}_1, \bar{x}_2)$. Тогда отношение правдоподобия имеет вид:

$$\begin{aligned} \Lambda[u(t, \bar{x})] &= \\ &= \exp\left\{-\frac{1}{2} \iint_{\Omega} \iint_{\Omega} u(t_1, \bar{x}_1) \left[\theta_N(t_1, t_2, \bar{x}_1, \bar{x}_2) - \theta_{NS}(t_1, t_2, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) \right] \times \right. \\ &\quad \left. \times u(t_2, \bar{x}_2) dt_1 d\bar{x}_1 dt_2 d\bar{x}_2 \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где Ω – пространственно-временная область наблюдения; $\theta_N(*)$ и $\theta_{NS}(*)$ – решения интегральных уравнений:

$$\iint_{\Omega} K_N(t_1, t_2, \bar{x}_1, \bar{x}_2) \theta_N(t_2, t_3, \bar{x}_2, \bar{x}_3) dt_2 d\bar{x}_2 = \delta(t_1 - t_3, \bar{x}_1 - \bar{x}_3); \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \left[K_N(t_1, t_2, \bar{x}_1, \bar{x}_2) + K_S(t_1, t_2, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) \right] \theta_{NS}(t_2, t_3, \bar{x}_2, \bar{x}_3) dt_2 d\bar{x}_2 = \\ = \delta(t_1 - t_3, \bar{x}_1 - \bar{x}_3). \end{aligned} \quad (4)$$

Из выражений (2) – (4) следует алгоритм оптимальной ПВО сигнала:

$$Q(\vec{\lambda}) = \iiint_{\Omega\Omega} u(t_1, \vec{x}_1) H(t_1, t_2, \vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{\lambda}) u(t_2, \vec{x}_2) dt_1 d\vec{x}_1 dt_2 d\vec{x}_2, \quad (5)$$

где

$$H(t_1, t_2, \vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{\lambda}) = \theta_N(t_1, t_2, \vec{x}_1, \vec{x}_2) - \theta_{NS}(t_1, t_2, \vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{\lambda}). \quad (6)$$

В операторном представлении выражения (5) и (6) имеют следующий вид:

$$Q(\vec{\lambda}) = (u, Hu);$$

$$H = K_N^{-1} - (K_N + K_S)^{-1}.$$

При слабом сигнале, когда $(K_N + K_S)^{-1} \approx K_N^{-1} - K_N^{-1} K_S K_N^{-1}$, имеем

$$H = K_N^{-1} K_S K_N^{-1}$$

или в развернутом виде

$$H(t_1, t_2, \vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{\lambda}) = \iiint_{\Omega\Omega} \theta_N(t_1, t_3, \vec{x}_1, \vec{x}_3) K_S(t_3, t_4, \vec{x}_3, \vec{x}_4, \vec{\lambda}) \times \\ \times \theta_N(t_4, t_2, \vec{x}_4, \vec{x}_2) dt_3 d\vec{x}_3 dt_4 d\vec{x}_4. \quad (7)$$

Пусть помеха – стационарна и слабокоррелирована на временном интервале T . Тогда из выражения (3) можно получить

$$\int_{\vec{x}} \dot{G}_N(f, \vec{x}_1, \vec{x}_2) \dot{B}_N(f, \vec{x}_2, \vec{x}_3) d\vec{x}_2 = \delta(\vec{x}_1 - \vec{x}_3), \quad (8)$$

где $\dot{G}_N(f, \vec{x}_1, \vec{x}_2)$ – взаимный спектр помехи; $\dot{B}_N(f, \vec{x}_1, \vec{x}_2)$ – спектр функции $\theta_N(\tau, \vec{x}_1, \vec{x}_2)$:

$$\dot{B}_N(f, \vec{x}_1, \vec{x}_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \theta_N(\tau, \vec{x}_1, \vec{x}_2) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau.$$

Если сигнал стационарен и описывается корреляционной функцией (1), то формулу (7) можно переписать так:

$$H(t_2 - t_1, \vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{\lambda}) = \\ = \iiint_{\Omega\Omega} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \theta_N(t_3 - t_1, \vec{x}_1, \vec{x}_3) g_S(f) G_S^*(f, \vec{x}_3, \vec{\lambda}) G_S(f, \vec{x}_4, \vec{\lambda}) \times \right. \\ \times \theta_N(t_2 - t_4, \vec{x}_4, \vec{x}_2) \exp(j2\pi f(t_4 - t_3)) df + \theta_N(t_3 - t_1, \vec{x}_1, \vec{x}_3) \times \\ \times \theta_N(t_2 - t_4, \vec{x}_4, \vec{x}_2) \sum_{n=1}^N a_n^2 G_S^*(f_n, \vec{x}_3, \vec{\lambda}) G_S(f_n, \vec{x}_4, \vec{\lambda}) \times \\ \left. \times \exp(j2\pi f_n(t_4 - t_3)) \right\} dt_3 d\vec{x}_3 dt_4 d\vec{x}_4. \quad (9)$$

С учетом принятых допущений о свойствах помехи, выражение (9) может быть записано в виде:

$$H(t_2 - t_1, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) = \int_{-\infty}^{\infty} B_0(f, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) \exp(j2\pi f(t_2 - t_1)) df + \sum_{n=1}^N B_d(f_n, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) \exp(-j2\pi f_n(t_2 - t_1)), \quad (10)$$

где $B_0(f, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda})$ – функция, определяющая в спектральной области структуру ПВО сплошной части спектра сигнала:

$$B_0(f, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) = g_S(f) D(f, \bar{x}_1, \bar{\lambda}) D(f, \bar{x}_2, \bar{\lambda}), \quad (11)$$

$D(f, \bar{x}_2, \bar{\lambda})$ – функция, определяющая в спектральной области пространственную часть структуры обработки сплошной части спектра сигнала:

$$D(f, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) = \int_{\bar{X}} B_N(f, \bar{x}_4, \bar{x}_2) G_S(f, \bar{x}_4, \bar{\lambda}) d\bar{x}_4. \quad (12)$$

Функция $B_d(f_n, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda})$ определяет в спектральной области структуру ПВО дискретной части спектра сигнала:

$$B_d(f_n, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) = \overline{a_n^2}^* D(f_n, \bar{x}_1, \bar{\lambda}) D(f_n, \bar{x}_2, \bar{\lambda}), \quad (13)$$

где $D(f_n, \bar{x}_2, \bar{\lambda})$ – функция, аналогичная функции (12), но соответствующая дискретной части спектра сигнала.

Полученные выражения могут быть использованы для определения функции $D(f, \bar{x}, \bar{\lambda})$ иным путем. Переписав выражение (8) в виде

$$\int_{\bar{X}} \dot{G}_N(f, \bar{x}_1, \bar{x}_2) \dot{B}_N(f, \bar{x}_2, \bar{x}_3) d\bar{x}_2 = \delta(\bar{x}_1 - \bar{x}_3),$$

умножим обе части на $G_S(f, \bar{x}_3, \bar{\lambda})$ и проинтегрируем по \bar{x}_3 . С учетом равенства (12) нетрудно перейти к уравнению

$$\int_{\bar{X}} \dot{G}_N(f, \bar{x}_1, \bar{x}_2) \dot{D}(f, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) d\bar{x}_2 = G_S(f, \bar{x}_1, \bar{\lambda}).$$

В спектральной области алгоритм ПВО сигнала может быть найден из выражения (5), с учетом соотношения (10), в следующем виде:

$$Q(\bar{\lambda}) = \int_{\bar{X}} \int_{\bar{X}} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}(f, \bar{x}_1) \dot{B}_0(f, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) \dot{U}(f, \bar{x}_2) df + \sum_{n=1}^N \dot{U}(f_n, \bar{x}_1) \dot{B}_d(f_n, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{\lambda}) \dot{U}(f_n, \bar{x}_2) \right\} d\bar{x}_1 d\bar{x}_2, \quad (14)$$

где $\dot{U}(f, \bar{x})$ и $\dot{U}(f_n, \bar{x})$ – соответственно сплошная и дискретная части спектра принимаемых колебаний.

В соответствии с выражениями (11), (13) и (14) алгоритм ПВО сигнала может быть представлен в виде:

$$Q(\vec{\lambda}) = \int_{-\infty}^{\infty} g_S(f) \left| \int_{\vec{x}} \dot{U}(f, \vec{x}) \dot{D}(f, \vec{x}, \vec{\lambda}) d\vec{x} \right|^2 df + \sum_{n=1}^N a_n^2 \left| \int_{\vec{x}} \dot{U}(f_n, \vec{x}) \dot{D}(f_n, \vec{x}, \vec{\lambda}) d\vec{x} \right|^2. \quad (15)$$

Рассмотренная оптимальная ПВО шумового сигнала (15) может быть реализована по $N+1$ -й канальной схеме (см. рисунок).

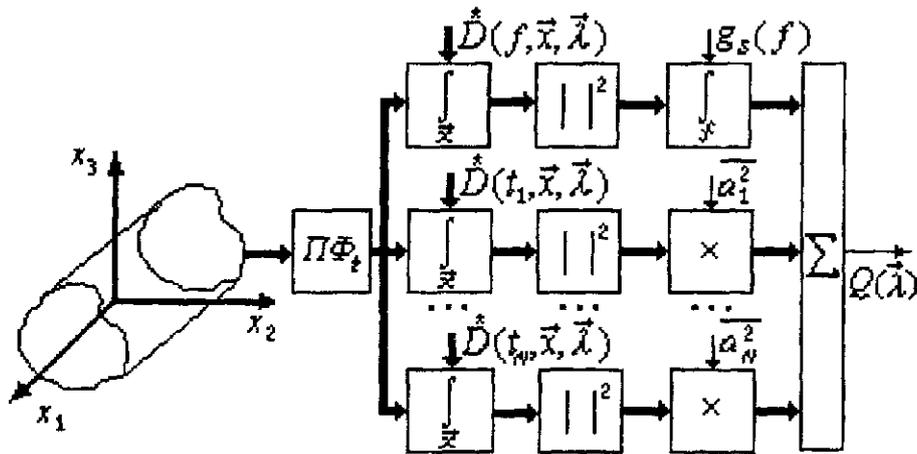


Схема спектрального алгоритма ПВО шумового сигнала в условиях сложного движения антенны в пространстве: $ПФ_t$ – преобразование Фурье по времени

Один из каналов настроен на обработку сплошной части спектра сигнала, а остальные – на обработку дискретных составляющих сигнала. Общим для всех каналов этапом обработки является временной спектральный анализ принятых колебаний в области $T(\vec{x})$. В результате этого формируется спектр $U(f, \vec{x})$. В канале, настроенном на обработку сплошной части спектра, проводятся интегрирование спектра $U(f, \vec{x})$ с весом $D(f, \vec{x}, \vec{\lambda})$ по пространству, вычисление квадрата модуля и затем интегрирование по частоте с весом $g_S(f)$. В каналах, настроенных на обработку дискретных составляющих сигнала, проводится интегрирование каждой дискретной составляющей спектра $U(f_n, \vec{x})$ с весом $D(f_n, \vec{x}, \vec{\lambda})$ по пространству и вычисление квадрата модуля. Полученные результаты обработки суммируются, причем результаты, соответствующие каналам, настроенным на обработку дискретных составляющих сигнала, суммируются с весом a_n^2 .

Таким образом, на основе ранее разработанных подходов к оптимизации ПВО при сложном движении антенны в пространстве синтезированы оптимальный и квазиоптимальный алгоритмы ПВО шумовых сигналов, имеющих многокомпонентную структуру. Эти алгоритмы используют модели шумовых сигналов, которые более адекватно описывают реальные сигналы.

Список литературы

1. Горбань И.И. Быстрый алгоритм пространственно-временной обработки сигналов для подвижных антенных решеток // Радиотехника. – 1989. – № 8. – С. 34–37.
2. Горбань И.И. Оптимальная пространственно-временная обработка сигналов в условиях движения антенны // Радиотехника. – 1990. – № 12. – С. 49–51.
3. Горбань И.И. Оптимальная пространственно-временная обработка шумового сигнала в условиях движения антенны // Радиотехника. – 1991. – № 11. – С. 24–27.
4. Горбань И.И. Оптимальная пространственно-временная обработка сигналов для подвижных антенн при воздействии локальных помех // Радиотехника. – 1993. – № 7. – С. 41–44.
5. Горбань И.И. Быстрые алгоритмы многоканальной пространственно-временной обработки сигналов с подавлением локальной помехи // Радиоэлектроника. – 1994. – № 4. – С. 9–13.
6. Gorban I.I. Estimation of signal parameters when antenna is complicately moving in space // Belgium, Forum Acusticum. – 1996. – P. 222.
7. Gorban I.I. Space-time signal processing algorithms for moving antennas // JASA. – 1996. – Vol. 100. – N 4. – Pt. 2. – P. 2638.
8. Maranda B.H., Fawcett J. A. Localisation of a manoeuvring target using simulated annealing // JASA. – 1993. – Vol. 94(3). Pt. 1. – P. 1376 – 1384.
9. Gorban I.I. New approaches in optimization of space-time signal processing in hydroacoustics. Course notes of the tutorial. Oceans'98 // IEEE. – 1998. – 69 p.
10. Калюжный А.Я. Методы пространственно-временной обработки гидролокационных сигналов в сложных сигнально-помеховых условиях при наличии дестабилизирующих факторов: Дисс. на соиск. науч. степени д-ра физ.-мат. наук. – К., 1996. – 348 с.
11. Yen C.N., Carey W. Application of synthetic aperture processing to towed array data // JASA. – 1989. – Vol. 86. – P. 754 – 765.
12. Yen N. A circular passive synthetic array: an inverse problem approach // IEEE J. Oceanic Eng. – 1992. – Vol. 17(1). – P. 40 – 47.
13. Rolt K.D., Schmidt N. Azimuthal ambiguities in synthetic aperture sonar and synthetic aperture radar imagery // IEEE J. Oceanic Eng. – 1992. – Vol. 17(1). – P. 73 – 79.
14. Горбань И.И., Волковецкий С. П. Точность совместной оценки частотно-угловых параметров гидроакустических сигналов при сложном движении антенны в пространстве // Математические машины и системы. – 1998. – № 2. – С. 39–44.

Стаття надійшла до редакції 30 вересня 1999 року.