

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ РАЗРЕШЕНИЯ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ

К.С. Васюта, канд. техн. наук

Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба

Рассмотрено влияние рассогласования между истинными параметрами помехи и теми, которые используются при обработке, на качество обнаружения. Получена функция рассогласования, учитывающая рассогласование по любому параметру, справедлива для любых сигналов и является развитием этого понятия для случая обнаружения сигнала на фоне коррелированной помехи.

* * *

Розглянуто вплив неузгодження між істинними параметрами завади та тими, які використовуються при обробці, на якість виявлення. Отримано функцію неузгодженості, що враховує неузгодження за любы параметром, справедлива для любых сигналів та є розвитком цього поняття для випадку виявлення сигналів на фоні корельованої завади.

* * *

Un-coordinated function, that was obtained in condition of disorder between the parameters of real noise and that ones that are used while signals processing, was represented. This function for sees non-coordination at any parameters for any signal in case of displaying a signal against background of correlating noise.

1. Постановка проблемы

Качество обнаружения сигнала на фоне помех определяется отношением сигнал/шум на выходе устройства обработки принимаемых сигналов. Это отношение будет наибольшим при точном знании параметров сигнала и помехи. Однако параметры сигнала и параметры помехи не всегда известны точно. Поэтому важно знать насколько ухудшается отношение сигнал/шум при рассогласовании параметров принимаемых сигналов и параметров устройства обработки.

2. Анализ последних исследований и публикаций

Основным способом компенсации помех является образование провалов в диаграмме направленности (ДН) приемной антенны в направлении на источники помеховых волн и оптимальная частотная фильтрация [1,3,4]. Естественно ожидать, что ошибки определения параметров помехи должны влиять на эффективность ее подавления. Вопросы, освещающие возможности и скорость процесса автоматической адаптации к помеховой обстановке изучены достаточно хорошо, им посвящено значительное число работ, например [1,2].

3. Выделение не решенных ранее частей общей проблемы

Однако еще недостаточно численно оценено влияние ошибок рассогласования между истинными и ожидаемыми параметрами помех. Ниже частично восполняется этот пробел.

4. Формулирование целей статьи

Для оценки меры эффективности подавления помех при наличии рассогласования между ожидаемыми и истинными значениями углов прихода помеховых волн, рассмотрим зависимость от него отношения напряжений, создаваемых полезным сигналом и помехами на выходе устройства оптимальной пространственной обработки.

5. Изложение основного материала исследований

Отношение напряжений, создаваемых полезным сигналом и помехами на выходе устройства оптимальной пространственной обработки запишем в виде

$$R(\delta\theta, \delta\hat{v}_1, \delta\hat{v}_2, \dots) = \frac{|Z_c(\delta\theta, \hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots)|}{\sqrt{\sigma_{\text{ш}}^2(\hat{\theta}, \hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots) + \sigma_{\text{ш}}^2(\delta\hat{v}_1/\hat{\theta}, \hat{v}_2, \dots) + \sigma_{\text{ш}}^2(\delta\hat{v}_2/\hat{\theta}, \hat{v}_1, \dots) + \dots}}, \quad (1)$$

где $\delta\theta = \hat{\theta} - \theta$ - рассогласование между оценкой $\hat{\theta}$ угла прихода сигнальной волны и ее истинным зна-

чением θ ; $\delta v_i = \hat{v}_i - v_i$ - рассогласование между оценкой \hat{v}_i угла прихода помеховой волны от i -того источника и его истинным значением v_i ; $|Z_c(\delta\theta|\hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots)|$ - модуль сигнальной части комплексного весового интеграла (напряжение создаваемое полезным сигналом на выходе устройства оптимальной обработки [3]), $\sigma_{u_i}^2(\hat{\theta}, \hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots) = \langle |Z_i(\hat{\theta}, \hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots)|^2 \rangle$ - дисперсия помеховой части комплексного весового интеграла, обусловленной собственным некоррелированным шумом на входе приемника; $\sigma_{n_i}^2(\delta v_i / \hat{\theta}, \hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots) = \langle |Z_{ni}(\delta v_i|\hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots)|^2 \rangle$ - дисперсия помеховой части комплексного весового интеграла, обусловленного i -тым внешним источником помех, создающим в антенне коррелированные по ее апертуре и некоррелированные по времени колебания.

Будем полагать, что параметры приемной антенны, полезных и помеховых сигналов позволяют производить отдельно пространственную и временную обработку (можно пренебречь различием групповых запаздываний для элементов антенны). Ниже ограничимся рассмотрением случая, когда воздействуют не более двух источников помех.

Используя полученное в [3] выражение для $|Z_c|$ и опуская аналогичные преобразования для вывода выражений $\sigma_{u_i}^2$ и $\sigma_{n_i}^2$ получим

$$|Z_c(\delta\theta|\hat{v}_1, \hat{v}_2)| = q^2 [\rho(\delta\theta) - k_1\rho(\hat{v}_1) - k_2\rho(\hat{v}_2)];$$

$$\sigma_{u_i}^2(\hat{\theta}, \hat{v}_1, \hat{v}_2) = 2\mathcal{E} / N_0 = q^2;$$

$$\sigma_{n1}^2(\delta v_1 / \hat{\theta}, \hat{v}_2) = \chi_1 q^2 [\rho(v_1 - \hat{\theta}) - k_1\rho(\delta v_1) - k_2\rho(\hat{v}_2 - v_1)]^2;$$

$$\sigma_{n2}^2(\delta v_2 / \hat{\theta}, \hat{v}_1) = \chi_2 q^2 [\rho(v_2 - \hat{\theta}) - k_1\rho(\hat{v}_1 - v_2) - k_2\rho(\delta v_2)]^2;$$

$$k_1 = \chi_1 [(1 + \chi_2)\rho(\hat{v}_1 - \hat{\theta}) - \chi_2\rho(\hat{v}_2 - \hat{v}_1)\rho(\hat{v}_2 - \hat{\theta})] / F;$$

$$k_2 = \chi_2 [(1 + \chi_1)\rho(\hat{v}_2 - \hat{\theta}) - \chi_1\rho(\hat{v}_1 - \hat{v}_2)\rho(\hat{v}_1 - \hat{\theta})] / F;$$

$$F = (1 + \chi_1)(1 + \chi_2) - \chi_1\chi_2|\rho(\hat{v}_2 - \hat{v}_1)|^2,$$

здесь $\rho(\theta)$ - нормированная диаграмма направлен-

ности M - элементной антенны; \mathcal{E} - энергия полезного сигнала; $\chi = N_i / N_0$ - отношение спектральной плотности мощности i -того источника помехи N_i и собственного шума N_0 на входе приемного устройства. Отсчет углов прихода принимаемых волн производится от направления прихода полезного сигнала ($\theta = 0$).

На рис. 1 приведено сечение $R(\delta\theta, 0) / R(0, 0)$, функции $R(\delta\theta, \delta v) / R(0, 0)$, представляющее собой известную зависимость [3] для последующего сравнения с ней исследуемой зависимости (сечения) $R(0, \delta v) / R(0, 0)$, изображенной на рис. 2, полученной при различных значениях χ . На этих рисунках по горизонтальным осям отложены значения $\delta \sin \theta \approx \delta \theta$ и $\delta \sin v \approx \delta v$, выраженные в единицах, обратных электрическому размеру антенны $l_3 = l / \lambda$, где l - ее геометрическая длина. Такие единицы соответствуют примерно ширине главного лепестка ДН антенны по уровню 0,7.

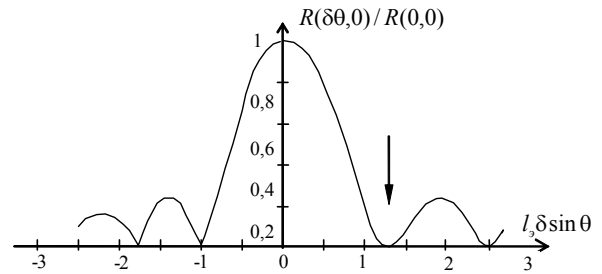


Рис. 1. Пространственная функция рассогласования для сигнальной волны

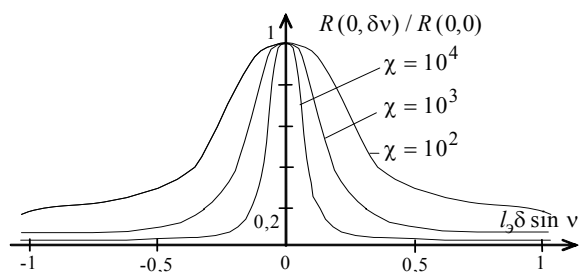


Рис. 2. Пространственная функция рассогласования для помеховой волны

Из рис. 1 и 2 видно, что угловое рассогласование δv для помеховой волны влияет на отношение сигнал/помеха сильнее углового рассогласования $\delta\theta$ для сигнальной волны. Это влияние тем сильнее, чем больше относительная величина интенсивности помехи χ . На рис. 3 изображена зависимость ширины $\Delta \sin v$ пика функции $R(0, \delta v) / R(0, 0)$ по уровню 0,7 от величины параметра χ .

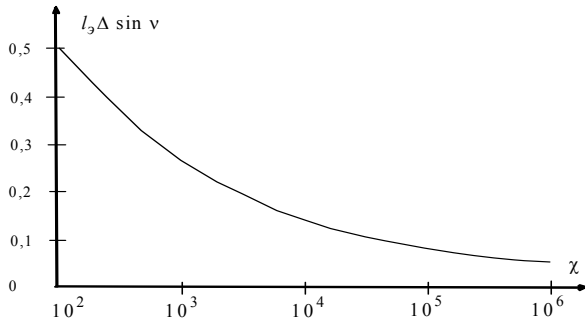


Рис. 3. Зависимость ширины пика функции рассогласования для помеховой волны от величины относительной интенсивности помехи χ

Из рисунка видно, что с ростом относительной интенсивности помехи ширина пика функции $R(0, \delta v) / R(0, 0)$ значительно сужается.

Из изложенного видно, что ошибки определения угла прихода помеховых волн значительно сильнее ухудшают качество пространственной обработки, чем ошибки определения угла прихода сигнала. Требования к точности определения углового положения источника помехи оказываются гораздо жестче требований к точности определения углового положения радиолокационной цели. Это может значительно ограничивать возможности оптимальной пространственной обработки и адаптации к помеховой обстановке. Далее анализируется влияние рассогласования между ожидаемыми и истинными частотами коррелированной помехи на качество обнаружения сигнала.

Ухудшение величины отношения сигнал/шум при таком рассогласовании будем характеризовать

функцией рассогласования. Параметры сигнала для простоты будем считать полностью известными.

При обнаружении сигнала с известными параметрами на фоне коррелированной помехи его напряжение на выходе устройства оптимальной обработки (оптимального фильтра) описывается известным соотношением [4]

$$\omega_{c \max}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{N(f)} df, \quad (2)$$

где f - истинная частота принимаемых сигнала и помехи;

$g(f)$ - спектральная плотность сигнала;

$N(f)$ - спектральная плотность мощности помехи.

Среднеквадратическое значение напряжения помехи на выходе устройства оптимальной обработки (оптимального фильтра) при полном согласовании параметров определяется соотношением [4]

$$\omega_n^2(t) = c \cdot \int_{-\infty}^{\infty} N(f) \cdot |K(f)|^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{N(f)} df, \quad (3)$$

где c - постоянный множитель (далее можно пренебречь); $|K(f)|^2$ - квазиоптимальная частотная характеристика фильтра.

Тогда отношение сигнал/шум по мощности на выходе устройства обработки при полном согласовании с учетом (2) и (3) можно записать в виде

$$\frac{\omega_{c \max}^2(0)}{\omega_n^2(0)} = \Psi(0) = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{N(f)} df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{N(f)} df} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{N(f)} df. \quad (4)$$

При рассогласовании $\Delta f = f - \hat{f}$ между истинным значением частоты помехи f и ожидаемым \hat{f} (используемым при настройке устройства обработки) квадрат напряжения сигнала на выходе устройства обработки можно определить соотношением

$$\omega_{c \max}^2(\Delta f) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{\hat{N}(f)} df \right]^2, \quad (5)$$

где $\hat{N}(f)$ - ожидаемая спектральная плотность мощ-

ности помехи, а среднеквадратическое значение напряжения помехи при наличии рассогласования Δf можно определить в виде

$$\bar{\omega}_n^2(\Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{g(f)}{\hat{N}(f)} \right|^2 \cdot N(f) df. \quad (6)$$

С учетом (5) и (6) отношение сигнал/шум по мощности при рассогласовании можно определить соотношением

$$\frac{\omega_{c \max}^2(\Delta f)}{\bar{\omega}_n^2(\Delta f)} = \Psi(\Delta f) = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{\hat{N}(f)} df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{g(f)}{\hat{N}(f)} \right|^2 \cdot N(f) df}. \quad (7)$$

Тогда нормированная функция рассогласования (нормированное значение отношения сигнал/шум на выходе устройства обработки) с учетом (4) и (7) может быть записана в виде

$$\rho(\Delta f) = \frac{\Psi(\Delta f)}{\Psi(0)} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{\hat{N}(f)} df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{g(f)}{\hat{N}(f)} \right|^2 \cdot N(f) df \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{N(f)} df}. \quad (8)$$

На рис. 4 представлены результаты численного анализа нормированной зависимости (8) - расстройки по частоте $\Delta f / \Pi$ (выраженной в единицах полосы сигнала Π). Зависимость получена для сигнала и помехи с прямоугольной формой спектра при различных относительных значениях спектральной плотности мощности помехи N . Область отрицательных значений $\Delta f / \Pi$ соответствует рассогласованию по частоте сигнала, а область положительных значений $\Delta f / \Pi$ по частоте помехи.

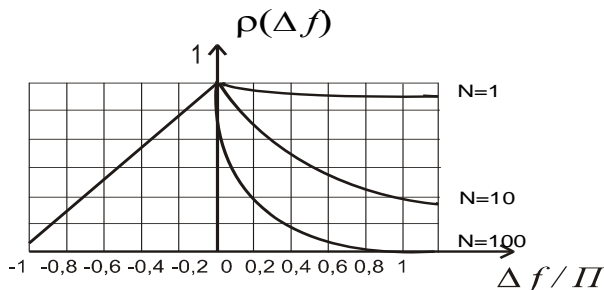


Рис.4. Частотная функция рассогласования помехи

Из рис. 4 видно, что рассогласование по частоте помехи гораздо сильнее влияет на величину отношения сигнал/шум (сигнал/помеха), чем рассогласование по частоте сигнала. Это влияние тем сильнее, чем мощнее помеха.

Выводы

Полученные результаты могут быть использованы при отсутствии априорной информации о помеховых сигналах при настройке устройств помехозащиты в радиотехнических устройствах.

Функция рассогласования (8) предполагает рассогласование по любому параметру, справедлива для любых сигналов и позволяет выявить новые закономерности разрешения сигналов. Функции рассогласования, учитывающие рассогласование сигналов, были введены Вудвордом в 1937 году для обнаружения сигнала на фоне «белого» шума [3,4]. Полученные функции рассогласования являются развитием этого понятия для случая обнаружения сигнала на фоне коррелированных помех.

Литература

1. Айзин Ф.Л., Коган Б.Л., Адаптивный синтез антенн с разделением сигналов по направлению прихода, -Радиотехника и электроника. -1968.- т.29.- №7.- С.1306-1315.
2. Chin Francois, Foo S.S. An adaptive algorithm for separating and tracking multiple directional sources in linear arrays // IEEE Trans. Antenas and Propog. - 1992. -vol.40.- №3.- pp.261-267
3. Ширман Я.Д. Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. -М: Радио и связь .-1981.-416 с.
4. Ширман Я.Д. и др. Справочник по радиоэлектронным системам/ Под ред. Ширмана Я.Д.-М: 1998.- 825 с.

Поступила в редакцию 18.08.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Минервин Н.Н., Харьковский военный университет, г. Харьков