

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ РАЗРЕШЕНИЯ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ

Н.Н. МИНЕРВИН, К.С. ВАСЮТА

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

Ключевые слова: качество обнаружения, функция рассогласования, коррелированная помеха

ВВЕДЕНИЕ

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.

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].

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

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.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЙ

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

$$R(\delta\theta, \delta v_1, \delta v_2, \dots) = \frac{|Z_c(\delta\theta|v_1, v_2, \dots)|}{\sqrt{\sigma_{\text{ш}}^2(v_1, v_2, \dots) + \sigma_{\text{п1}}^2(\delta v_1 / \theta, v_2, \dots) + \sigma_{\text{п2}}^2(\delta v_2 / \theta, v_1, \dots) + \dots}}, \quad (1)$$

где $\delta\theta = \hat{\theta} - \theta$ – рассогласование между оценкой $\hat{\theta}$ угла прихода сигнальной волны и ее истинным значением θ ; $\delta v_i = \hat{v}_i - v_i$ – рассогласование между оценкой \hat{v}_i угла прихода помеховой волны от i -го источника и его истинным значением v_i ; $|Z_c(\delta\theta|v_1, v_2, \dots)|$ – модуль сигнальной части комплексного весового интеграла (напряжение, создаваемое полезным сигналом на выходе устройства оптимальной обработки [3]), $\sigma_{\text{ш}}^2(\theta, v_1, v_2, \dots) = \langle |Z_i(\theta, v_1, v_2, \dots)|^2 \rangle$ – дисперсия помеховой части комплексного весового интеграла, обусловленной собственным некоррелированным шумом на входе приемника; $\sigma_{\text{п1}}^2(\delta v_1 / \theta, v_1, v_2, \dots) = \langle |Z_{\text{п1}}(\delta v_1|v_1, v_2, \dots)|^2 \rangle$ – дисперсия помеховой части комплексного весового интеграла, обусловленного i -м 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 $\sigma_{\text{ш}}^2$ и $\sigma_{\text{п1}}^2$, получим

$$|Z_c(\delta\theta|v_1, v_2)| = q^2 [\rho(\delta\theta) - k_1\rho(v_1) - k_2\rho(v_2)];$$

$$\sigma_{\text{ш}}^2(\theta, v_1, v_2) = 2\mathcal{E} / N_0 = q^2;$$

$$\sigma_{\text{п1}}^2(\delta v_1 / \theta, v_2) = \chi_1 q^2 [\rho(v_1 - \theta) - k_1\rho(\delta v_1) - k_2\rho(v_2 - v_1)]^2;$$

$$\sigma_{\text{п2}}^2(\delta v_2 / \theta, v_1) = \chi_2 q^2 [\rho(v_2 - \theta) - k_1\rho(v_2 - v_1) - k_2\rho(\delta v_2)]^2;$$

$$k_1 = \chi_1 [(1 + \chi_2)\rho(v_1 - \theta) - \chi_2\rho(v_2 - v_1)\rho(v_2 - \theta)] / F;$$

$$k_2 = \chi_2 [(1 + \chi_1)\rho(v_2 - \theta) - \chi_1\rho(v_1 - v_2)\rho(v_1 - \theta)] / F;$$

$$F = (1 + \chi_1)(1 + \chi_2) - \chi_1\chi_2 |\rho(v_2 - v_1)|^2,$$

здесь $\rho(\theta)$ – нормированная диаграмма направленности M -элементной антенны; \mathcal{E} – энергия полезного сигнала; $\chi = N_i / N_0$ – отношение

спектральной плотности мощности i -го 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 $R(\delta\theta, \delta\nu)/R(0, 0)$, представляющее собой известную зависимость [3] для последующего сравнения с ней исследуемой зависимости (сечения) $R(0, \delta\nu)/R(0, 0)$, изображенной на рис. 2, полученной при различных значениях χ . На этих рисунках по горизонтальным осям отложены значения $\delta\sin\theta \approx \delta\theta$ и $\delta\sin\nu \approx \delta\nu$, 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.

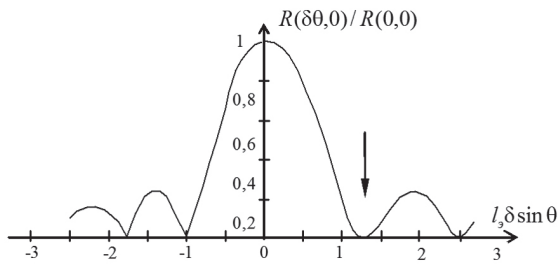


Рис. 1. Пространственная функция рассогласования для сигнальной волны

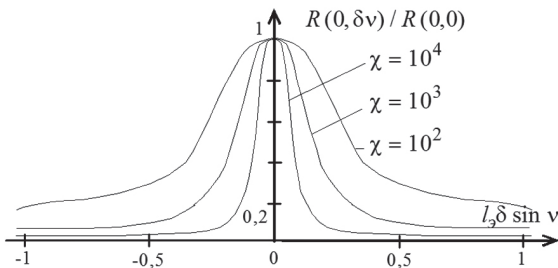


Рис. 2. Пространственная функция рассогласования для помеховой волны

Из сравнения рисунков 1 и 2 видно, что угловое рассогласование $\delta\nu$ для помеховой волны влияет на отношение сигнал/помеха значительно 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 $\Delta\sin\nu$ пика функции $R(0, \delta\nu)/R(0, 0)$ по уровню 0,7 от величины параметра χ .

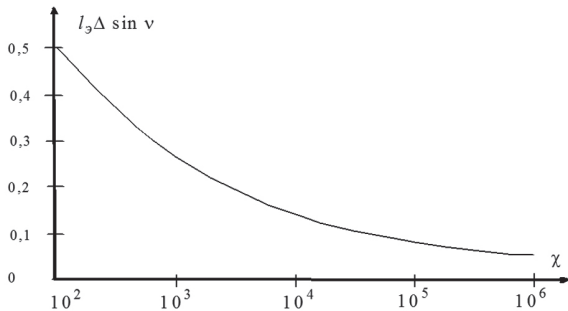


Рис. 3. Зависимость ширины пика функции рассогласования для помеховой волны от величины относительной интенсивности помехи χ

Из рисунка видно, что с ростом относительной интенсивности помехи ширина пика функции $R(0, \delta\nu)/R(0, 0)$ 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]

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

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

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

В случае рассогласования $\Delta f = f - \hat{f}$ между истинным значением частоты помехи f и ожидаемым \hat{f} (используемым при настройке устрой-

ства обработки) квадрат напряжения сигнала на выходе устройства обработки можно определить соотношением

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

где $N(f)$ – ожидаемая спектральная плотность мощности помехи, а среднеквадратическое значение напряжения помехи при наличии рассогласования Δf можно определить в виде

$$\omega_{\text{п}}^{-2}(\Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{N(f)} \cdot N(f) df. \quad (6)$$

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

$$\frac{\omega_{\text{с max}}^2(\Delta f)}{\omega_{\text{п}}^{-2}(\Delta f)} = \Psi(\Delta f) = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{N(f)} df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|g(f)|^2}{N(f)} \cdot N(f) df}. \quad (7)$$

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

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

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.

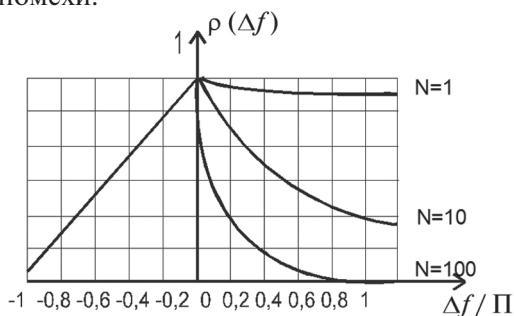


Рис. 4. Частотная функция рассогласования помехи

Из рисунка 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. – P. 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. Я.Д. Ширмана. – М.: 1998. – 825 с.

Поступила в редколлегию 8.10.2013

Минервин Николай Николаевич, фото и сведения об авторе см. на с. 486.

Васюта Константин Станиславович, фото и сведения об авторе см. на с. 486.

УДК 621.391.26

Розвиток теорії розрізнення сигналів на тлі корельованих завад / М.М. Мінервін, К.С. Васюта // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2013. – Том 12. – № 4. – С. 490–492.

Розглянуто вплив розузгодження між істинними параметрами завади та тими, які використовуються під час обробки, на якість виявлення. Отримано функцію розузгодження, що враховує розузгодження за будь-яким параметром, справедливою для довільних сигналів, що є розвитком цього поняття для випадку виявлення сигналів на фоні корельованої завади.

Ключові слова: якість виявлення, функція розузгодження, корельована завада.

Лл.: 4. Бібліогр.: 4 найм.

UDC 621.391.26

Development of the theory of resolution of signals against correlated noises / N.N. Minervin, K.S. Vasyuta // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2013. – Vol. 12. – № 4. – P. 490–492.

The paper considers the effect of a mismatch on the quality of detection between real noise parameters and those that are used in processing. This function foresees non-coordination in any parameters for any signals in case of displaying a signal against the background of a correlated noise.

Keywords: quality of detection, frustration function, correlated noise.

Fig.: 4. Ref.: 4 items.