

УДК 621.396.96

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ-
РАСПОЗНАВАНИЯ АМПЛИТУДНО-КОРРЕЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ**

АДХАМ САЛИМ АЛЬ-МУАЗ, С.В. ШАЛЯПИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 2 апреля 2007*

Данная работа посвящена анализу эффективности алгоритмов обработки амплитудно-коррелированных сигналов. Приводятся сравнительные вероятностные характеристики алгоритмов обработки комплексного и амплитудно-коррелированного сигналов.

Ключевые слова: вероятностные характеристики, регулярно-коррелированный, попарно-комплексированный, анализ, корреляционная матрица.

Введение

Расчетам эффективности алгоритмов обработки дискретной выборки сигналов посвящено достаточно большое число работ, в которых приведены аналитические методики анализа характеристик обнаружения, измерения и распознавания [1–6]. Для произвольно коррелированной нормально распределенной выборки сигналов в случае принятия двухальтернативных решений получены аналитические выражения для расчета вероятностей правильных и ложных решений [1, 6]. Для малоэлементной выборки сигналов, разработан точный метод анализа для многоальтернативных решающих правил [2]. Для выборки сигнала большой размерности и многоальтернативного решающего правила удалось решить задачу анализа путем разложения многомерной плотности вероятности сигналов на выходах каналов обработки в ряды по ортогональным полиномам [3].

Для выборки сигнала, имеющей распределение, отличное от нормального, аналитические выражения для вероятностных характеристик обнаружения-распознавания получить не удастся, за исключением некоторых частных случаев.

Одним из способов, позволяющих получить сравнительно точную оценку вероятности правильных и ложных решений, является статистическое моделирование устройства обработки. Поэтому в данной работе решается задача анализа при помощи статистического моделирования устройств обработки амплитудно-коррелированного сигнала. Для сравнения эффективности исследуемого алгоритма с известными алгоритмами обработки комплексных сигналов проводится моделирование таких алгоритмов. Приводятся результаты моделирования, представленные в виде зависимостей вероятностей правильных решений от отношения сигнал/фон.

Постановка задачи

В известных работах [4–7] даны определения радиолокационному портрету как совокупности N комплексных амплитуд сигналов $\xi_{k0} = (\xi_1^{k0}, \dots, \xi_N^{k0})$, относящихся

к различным элементам пространства радиолокационного наблюдения. В зависимости от положенных в основу принятия решений классификационных признаков пространством радиолокационного наблюдения могут быть [5, 6] время, частота, время запаздывания, доплеровское смещение частоты, пространственная частота (угловые координаты), поляризация. Элементы комплексного вектора ξ_{k0} , отраженного от цели k -го класса, являются элементами регулярно-коррелированного радиолокационного портрета [12–14]. Им может быть флуктуационный, частотно-коррелированный или пространственно коррелированный портрет. Приведем сведения по обработке сигналов, полученные в более ранних работах.

Один из способов оптимальной обработки комплексного портрета ξ_{k0} заключается в формировании отношения правдоподобия [4–11], которое при известной корреляционной матрице сигнала примет вид

$$z_{k0} = \xi^* \mathbf{Q}^{k0} \xi + a_{k0}, \quad (1)$$

где $\mathbf{Q}^{k0} = \mathbf{R}_0^{-1} - \mathbf{R}_{k0}^{-1}$ — матрица обработки сигнала; $\mathbf{R}_0 = \overline{\xi_0 \xi_0^*} = \{2\sigma_0^2 \delta_{n,m}\}$ — корреляционная матрица фона; σ_0^2 — дисперсия (мощность) фона; $\delta_{m,n}$ — символ Кронекера; $\mathbf{R}_{k0} = \{R_{n,m}^{k0}\} = \overline{\xi_{k0} \xi_{k0}^*}$ — корреляционная матрица отраженного от цели сигнала; $R_{n,m}^{k0} = 2\sigma_k^2 r_k((m-n)\Delta\tau_\chi) \exp(i\Delta\varphi_{n,m}^k) + 2\sigma_0^2 \delta_{n,m}$ — элемент корреляционной матрицы сигнала; σ_k^2 — мощность отраженного от цели сигнала; $a_{k0} = \ln \frac{\det \mathbf{R}_0}{\det \mathbf{R}_{k0}}$ — смещение.

Такой алгоритм подразумевает сочетание когерентного и некогерентного накопления сигнала (портрета) [4, 5].

Если средняя межэлементная разность фаз $\Delta\varphi_{n,m}^k$ является априорно-неизвестной величиной и ее изменения не носят регулярного характера $\Delta\varphi_{n,n+1}^k \neq \Delta\varphi_{m,m+1}^k$, $n \neq m$, то отказываются от обработки комплексных сигналов, переходя к формированию и обработке амплитудных отсчетов сигнала [12–14].

Одним из распространенных на практике способов, который преодолевает априорную неопределенность относительно средней межэлементной разности фаз, является отказ от когерентной обработки сигнала. В этом случае матрицу \mathbf{R}_{k0} можно считать диагональной $\mathbf{R}_{k0} = \{R_{n,m}^{k0}\} = \{2(\sigma_k^2 + \sigma_0^2) \delta_{m,n}\}$, тогда в соответствии с алгоритмом (1) будет осуществляться некогерентное накопление на всем интервале наблюдения:

$$z_{k0} = \frac{\xi^* \xi}{2^N (\sigma_0^2 + \sigma_k^2)^N} + a_{k0} = \frac{1}{2^N} \sum_{n=1}^N \frac{\rho_n^2}{(\sigma_0^2 + \sigma_k^2)^N} + N \ln \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2 + \sigma_k^2}, \quad (2)$$

где $\rho_n = |\xi_{nk}|$, $n = \overline{1, N}$ — амплитуды отсчетов комплексного сигнала ξ_{k0} , образующие вектор $\mathbf{\rho} = \{\rho_1, \dots, \rho_n, \dots, \rho_N\}$.

В дальнейшем вектор $\mathbf{\rho} = \{\rho_1, \dots, \rho_n, \dots, \rho_N\}$, состоящий из совокупности амплитуд комплексного вектора ξ_{k0} , будем называть амплитудно-коррелированным сигналом (портретом).

Отказ от учета межэлементной корреляции делает алгоритм (2) достаточно простым, однако при этом происходит потеря части информации, которая содержалась в корреляции амплитудных отсчетов сигнала. Такая потеря делает невозможным процесс идентификации сигналов разных классов.

Другой подход применительно к априорно-неизвестной разности фаз основан на известной процедуре усреднения отношения правдоподобия по априорно-неизвестным параметрам [6, 8, 10]. В этом случае усреднение производится по средней межэлементной разности фаз, в результате которого удается для некоторых частных случаев получить

многомерный закон распределения вектора ρ [12–14] и осуществить его обработку в соответствии с выражением [14]

$$z_{k0} = b_{1,k} \sum_{n=1}^N \rho_n^2 + b_{2,k} \sum_{n=2}^{N-1} \rho_n^2 + \sum_{n=1}^{N-1} \ln \left[I_0 \left(b_{3,k} \rho_n \rho_{n+1} \right) \right] + a_k, \quad (3)$$

где $b_{1,k}$ — первый весовой коэффициент; $b_{2,k}$ — второй весовой коэффициент; $b_{3,k}$ — третий весовой коэффициент; a_k — смещение.

В [14] выражение (3) получило название "алгоритм обработки амплитудного регулярно-коррелированного сигнала". В этой же работе приведен еще один алгоритм обработки сигнала, имеющий меньше ограничений по сравнению с (3). Данный алгоритм основан на попарном комплексировании вектора ρ , когда из отсчетов этого вектора образуют пары сигналов во всевозможных сочетаниях. Каждую пару, составленную из n_1 и n_2 -го отсчетов, подвергают обработке с учетом амплитудной корреляции:

$$z_{k0}^{n_1, n_2} = b_{1,k}^{n_1, n_2} \left(\rho_{n_1}^2 + \rho_{n_2}^2 \right) + \ln \left[I_0 \left(b_{2,k}^{n_1, n_2} \rho_{n_1} \rho_{n_2} \right) \right] + a_k^{n_1, n_2}, \quad (4)$$

где $b_{1,k}^{n_1, n_2}$ — первый весовой коэффициент; $b_{2,k}^{n_1, n_2}$ — второй весовой коэффициент; $a_k^{n_1, n_2}$ — смещение.

Окончательный результат получается путем простого суммирования результатов обработки отдельных пар:

$$z_{k0} = \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=n_1+1}^N z_{k0}^{n_1, n_2}. \quad (5)$$

Выражения (4), (5) определяют алгоритм обработки сигнала, который в [14] получил название "алгоритм обработки амплитудного регулярно-коррелированного портрета с попарным комплексированием элементов".

Проведем сравнительный анализ эффективности рассмотренных выше алгоритмов обработки сигнала (1)–(5). В качестве характеристики эффективности указанных алгоритмов будем рассматривать средние по классам вероятности правильного обнаружения и средние вероятности правильного обнаружения-распознавания классов сигналов.

Методика анализа

Анализ вероятностных характеристик обнаружения-распознавания проведен методом математического моделирования. Для этого на первом этапе для заданного отношения сигнал/фон генерируется принятый сигнал, обладающий корреляционной матрицей \mathbf{R}_{k0} (1). На втором этапе сформированный сигнал подвергается обработке:

- по оптимальному алгоритму (1);
- по алгоритму с некогерентным накоплением на всем интервале наблюдения (2);
- по алгоритму обработки амплитудного регулярно-коррелированного сигнала (3);
- по алгоритму обработки амплитудного регулярно-коррелированного портрета с попарным комплексированием элементов (4, 5).

Результаты обработки сравниваются с порогами, устанавливаемыми по критерию Неймана–Пирсона [4, 10], и производится подсчет правильных решений об обнаружении. После этого сигналы разных каналов сравниваются, и принимается решение о классе сигнала на входе устройства обработки. В целях оценки вероятности правильного распознавания, принятые решения накапливаются. В результате многократного повторения процедуры генерации сигнала, его обработки и операций сравнения, производится оценка вероятности правильного обнаружения сигнала по каждому из 4-х алгоритмов и оценка вероятности правильного обнаружения-распознавания сигналов по 3-м алгоритмам. В силу отсутствия информативных признаков алгоритм некогерентного накопления в распознавании не участвует.

Процедура моделирования повторяется для нескольких отношений сигнал/фон и для двух аппроксимаций корреляционной функции флуктуаций [4] — экспоненциальной и гауссовой.

Генерация сигнала с заданными корреляционными свойствами осуществляется в соответствии со следующим выражением

$$\xi_{k0} = \mathbf{V}_{k0} \boldsymbol{\eta}, \quad (6)$$

где \mathbf{V}_{k0} — нижняя треугольная матрица, полученная путем разложения корреляционной матрицы \mathbf{R}_{k0} по методу Холецкого [16] $\mathbf{R}_{k0} = \mathbf{V}_{k0} \mathbf{V}_{k0}^*$; $\boldsymbol{\eta} = (\eta_1, \dots, \eta_N)^T$ — случайный вектор нормально-распределенных комплексных величин с нулевым математическим ожиданием и единичной корреляционной матрицей \mathbf{E} размерности N .

Действительно, корреляционная функция вектора ξ_{k0} с учетом (6) определяется выражением

$$\mathbf{R}_\xi = \overline{\xi_{k0} \xi_{k0}^*} = \overline{\mathbf{V}_{k0} \boldsymbol{\eta}_{k0} (\mathbf{V}_{k0} \boldsymbol{\eta}_{k0})^*} = \mathbf{V}_{k0} \underbrace{\overline{\boldsymbol{\eta}_{k0} \boldsymbol{\eta}_{k0}^*}}_{\mathbf{E}} \mathbf{V}_{k0}^* = \mathbf{V}_{k0} \mathbf{V}_{k0}^* = \mathbf{R}_{k0}. \quad (7)$$

Вероятностные характеристики

Анализ характеристик проводился для двухканального устройства, осуществляющего обработку сигналов двух разных видов. При этом для анализа характеристик было выбрано два варианта.

Первый вариант предполагает, что вид аппроксимаций корреляционных функций обоих сигналов одинаковый, а значения межэлементных коэффициентов корреляции — разные:

- вид аппроксимации корреляционной функции — экспоненциальный;
- коэффициент корреляции первого сигнала 0,7, второго — 0,95.

Второй вариант предполагает, что аппроксимации корреляционных функций сигналов разные, а значения межэлементных коэффициентов корреляции — одинаковые:

- вид аппроксимации корреляционной функции первого сигнала — экспоненциальный, второго — гауссовый;
- коэффициент межэлементной корреляции обоих сигналов 0,9.

На рис. 1 приведены средние для двух классов сигналов вероятности правильного обнаружения флуктуирующего сигнала, характеризующихся экспоненциальной корреляционной функцией (вариант первый).

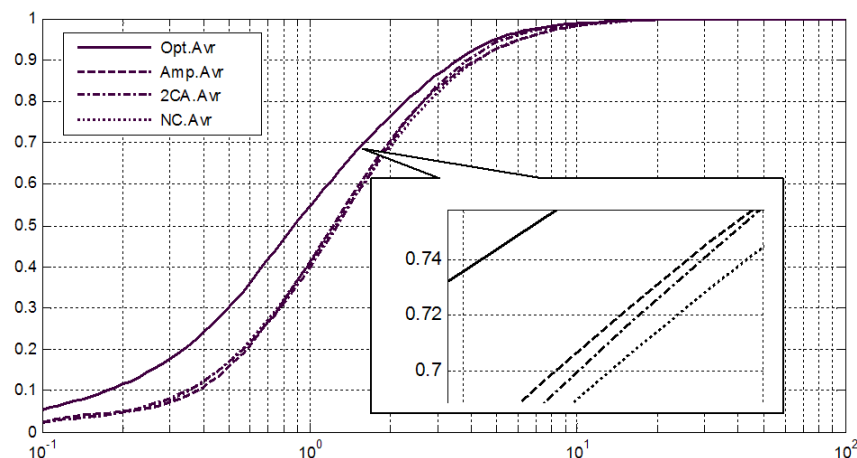


Рис. 1. Средние вероятности правильного обнаружения флуктуирующих сигналов (Opt — оптимальный алгоритм; Amp — алгоритм обработки амплитудно-коррелированного сигнала; 2CA — алгоритм обработки попарно-комплексированного сигнала; NC — некогерентное накопление)

Из графика видно, что все алгоритмы, не использующие информацию о межэлементной разности фаз (осуществляющие некогерентное накопление), имеют примерно одинаковую эффективность обнаружения сигнала (графики практически совпадают) и проигрывают в эффективности оптимальному алгоритму, осуществляющему когерентное накопление сигнала. Вероятностные характеристики обнаружения для второго варианта практически не отличаются от первого и поэтому не приводятся.

На рис. 1 приведен фрагмент описанного выше графика в крупном масштабе. Из рисунка видно, что вероятности правильного обнаружения для алгоритмов, учитывающих амплитудную корреляцию, несколько больше, чем вероятности правильного обнаружения при некогерентном накоплении сигнала. Однако, разница настолько мала, что при решении только задачи обнаружения сигнала целесообразно использовать более простой алгоритм некогерентного накопления сигнала.

На рис. 2 приведены средние вероятности правильного обнаружения-распознавания сигналов в соответствии с первым вариантом, когда коэффициенты межэлементной корреляции двух типов сигналов разные, а вид корреляционных функций, аппроксимированных экспоненциальной зависимостью, одинаковый.

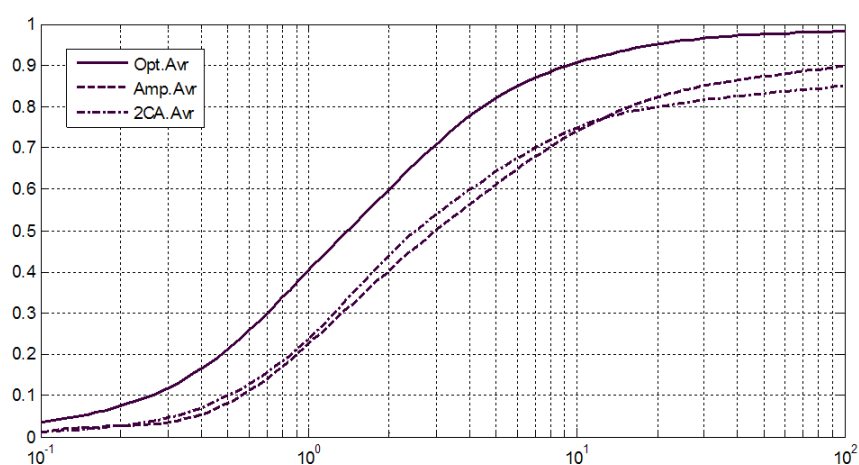


Рис. 2. Средние вероятности правильного обнаружения-распознавания флуктуирующих сигналов (вариант второй)

Отметим, что при низком отношении сигнал/фон, эффективность алгоритма обработки амплитудно-коррелированного сигнала ниже эффективности алгоритма обработки попарно-комплексированного сигнала. По мере увеличения отношения сигнал/фон алгоритм обработки амплитудно-коррелированного сигнала асимптотически стремится к оптимальному и показывает более высокие характеристики, чем алгоритм обработки попарно-комплексированного сигнала. Таким образом, неоптимальность алгоритма обработки амплитудно-коррелированного сигнала возрастает по мере уменьшения отношения сигнал/фон. Это объясняется отклонениями корреляционной функции смеси сигнала и фона от экспоненциального вида.

На рис. 3 приведены средние вероятности правильного обнаружения-распознавания сигналов в соответствии со вторым вариантом, когда коэффициенты межэлементной корреляции у двух типов сигналов одинаковые, а виды корреляционных функции разные.

В этом случае, эффективность алгоритма обработки попарно-комплексированного сигнала выше эффективности алгоритма обработки амплитудно-коррелированного сигнала, поскольку коэффициенты междупериодной корреляции у обоих сигналов одинаковые, а алгоритм обработки амплитудно-коррелированных сигналов нечувствителен к форме корреляционной функции принятого сигнала.

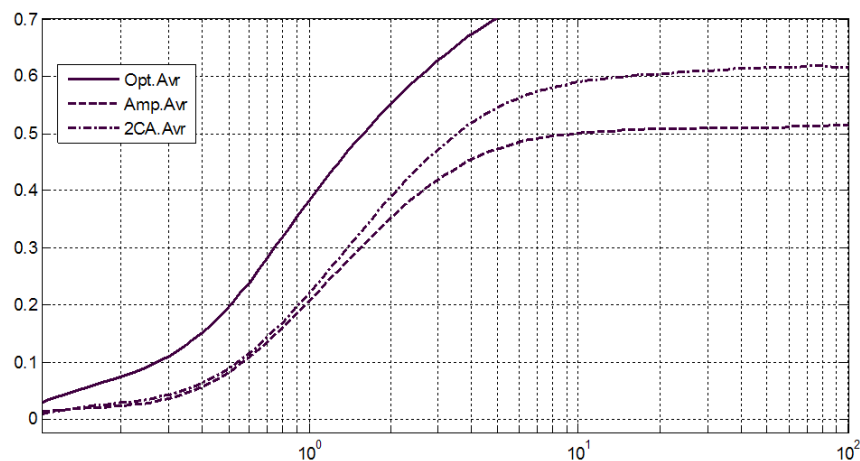


Рис. 3 Средние вероятности правильного обнаружения-распознавания флуктуирующих сигналов (вариант второй)

В данной работе приведено два алгоритма обработки сигнала, способных преодолеть априорную неопределенность относительно средней межэлементной разности фаз:

- алгоритм обработки амплитудно-коррелированного сигнала (3);
- алгоритм обработки попарно-комплексированного сигнала (4, 5).

Оба алгоритма, работающих с амплитудными отсчетами сигнала, проигрывают в эффективности оптимальному алгоритму.

Заключение

Оба алгоритма имеют примерно одинаковую эффективность при решении задачи обнаружения сигнала, но несколько более высокую, чем алгоритм некогерентного накопления сигнала. Однако прирост эффективности настолько мал, что при решении только задачи обнаружения сигнала целесообразно использовать более простой алгоритм некогерентного накопления сигнала.

При решении задачи распознавания или совместного обнаружения-распознавания, относительная эффективность алгоритмов разная и зависит от отношения сигнал/фон и вида корреляционных функций сигнала. Так алгоритм обработки амплитудно-коррелированного сигнала имеет большую эффективность, когда флуктуации сигнала характеризуются экспоненциальной корреляционной функцией, и обеспечивается достаточно высокое отношение сигнал/фон. В случае, когда корреляционные функции сигналов различаются по виду или обеспечивается недостаточно высокое отношение сигнал/фон, преимущества имеет алгоритм обработки попарно-комплексированного сигнала.

THE DETECTION-RECOGNITION ALGORITHMS CHARACTERISTICS ANALYSIS OF THE AMPLITUDE-CORRELATED SIGNALS

ADHAM SALIM MOUAZ, S.V. SHALIAPIN

Abstract

The work is devoted to the processing algorithms efficiency analysis of the amplitude-correlated signals. In this article the comparative probability characteristics of processing algorithms of the complex and amplitude-correlated signals are given.

Литература

1. *Проскурин В.И.* // Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30, №7. С. 1335–1340.
2. *Курлович В.И., Шаляпин С.В., Гейстер С.Р.* // Радиотехника и электроника. 1999. № 1.
3. *Ярмолик С.Н., Шаляпин С.В.* // Докл. БГУИР 2003. Т. 1, №3. С. 28–32.
4. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. М., 1983. Ч. I.
6. *Охрименко А.Е.* Основы извлечения, обработки и передачи информации. Ч. 3. Распознавание-различение сигналов. Минск, 1995.
7. *Курлович В.И., Шаляпин С.В.* Основы теории радиосистем. Минск, 2000.
8. *Kurlovich V.I., Bukato V.P., Geyster S.R. et al.* // Electromagnetic Waves & Electronic Systems. 1999. Vol. 4, № 1. P. 5–11.
9. *Репин В.Г., Тартаковский Г.П.* Статистический синтез в условиях априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М., 1977.
10. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М., 1991.
11. *Перов А.И.* Статистическая теория радиосистем: Учеб. пособие для вузов. М., 2003.
12. *Kurlovich V.I., Geyster S.R.* // Electromagnetic Waves & Electronic Systems. 1999. Vol. 4, № 1. P. 11–17.
13. *Шаляпин С.В., Ярмолик С.Н., Лаврентьев Е.А.* // Материалы IX Междунар. НТК "Радиолокация, навигация, связь". 22–24 апреля 2003 г. Воронеж. Воронеж, 2003. С. 1404–1412.
14. *Шаляпин С.В., Адхам С. Муаз, Фирсаков А.А.* // Материалы XII Междунар. НТК "Радиолокация, навигация, связь". 18–20 апреля 2006 г. Воронеж. Воронеж, 2003. С. 1507–1518 .
15. *Адхам Салим Аль-Муаз., Шаляпин С.В.* // Докл. БГУИР. 2007. Т. 5, № 2. С. 64–68.
16. *Адхам Салим Аль-Муаз., Шаляпин С.В.* // Докл. БГУИР. 2007. Т. 5, № 3. С. 43–49.
17. *Гантмахер Ф.Р.* Теория матриц. М., 1967.