

1. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер. – М: Техносфера, 2007. – 1019 с.
2. Троцишин І.В. Шляхи підвищення роздільної здатності шкали вимірювального перетворення ЦАП і АЦП / І.В.Троцишин, О.П.Войтюк, Н.І.Троцишина // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах...- 2010.- №2.- С236-242.
3. Троцишин І.В. Реалізація принципів квантової теорії вимірювань амплітудних параметрів сигналів на прикладі Атенюатора-подільника Троцишина / І.В.Троцишин // Вісник ХНУ.- 2011.- №2.- Технічні науки.- С.213-223.
4. Троцишин І.В. Квантова теорія вимірювального перетворення – принципово нові можливості в методології побудови ЦАП і АЦП / І.В.Троцишин, О.П.Войтюк // Вісник ХНУ.- 2011.- №4.- Технічні науки.- С.264-271.
5. Заявка на патент України, №а 2011 026672, пріоритет: 09.03.2011. Атенюатор-подільник Троцишина.

Надійшла 24.9.2011 р.

УДК 621.396.367

О.Н. ШИНКАРУК

Хмельницький національний університет

Е.С. ЛЕНКОВ, К. М. СЕМИБАЛАМУТ

Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА КЕЙПОНА ПРИ МНОГОКАНАЛЬНОМ ПРИЁМЕ СИГНАЛОВ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Получено соотношение, позволяющее определить вероятность обнаружения сигнала со случайной начальной фазой в обнаружителе на основе одного из известных алгоритмов высокого разрешения. Оцениваются потери в отношении сигнал/помеха.

A relation that indicates the probability of detecting a signal from a random initial phase detector based on a well-known algorithms for high resolution. Estimated losses in the signal / noise ratio.

Ключевые слова: алгоритм Кейпона, сигнал/помеха, корреляция.

Постановка задачи

Определить показатели качества обнаружения сигнала со случайной начальной фазой в активных РЛС и шумоподобного сигнала в устройствах пеленгации с цифровой линейной антенной решёткой (ЦЛАР) при условии, что для объединения выходных сигналов приёмных каналов ЦЛАР используется алгоритм Кейпона.

Объект, методы и основные результаты исследований

Объектом исследования является РЛС и пеленгационные каналы обнаружения с сигналом, длительность которого соизмерима с временем оценки корреляционной матрицы выходных сигналов приёмных каналов ЦЛАР. Для решения поставленной задачи использовался аппарат теории вероятностей, математической статистики и статистического моделирования.

Если частотные характеристики приёмных каналов ЦЛАР согласованы с частотным спектром сигнала от цели, то алгоритм оптимального обнаружения сигнала при многоканальном приёме может быть представлен в виде [1]:

$$z_o = \left| \mathbf{K}_o^H \mathbf{Y} \right| \geq h_o, \quad (1)$$

где z_o – модульное значение выходного сигнала ЦЛАР, представляющего собой результат взвешенного объединения выходных сигналов приёмных каналов ЦЛАР; h_o – порог обнаружения, определяемый заданным значением вероятности ложной тревоги; \mathbf{K}_o – N -мерный вектор-столбец весовых коэффициентов (N – число приёмных каналов ЦЛАР); \mathbf{Y} – вектор-столбец выходных сигналов приёмных каналов ЦЛАР; H – знак эрмитового сопряжения.

Знак модуля в (1) означает, что при обнаружении сигнала со случайной начальной фазой с порогом сравнивается значение огибающей выходного сигнала ЦЛАР.

Вектор весовых коэффициентов, обеспечивающий максимизацию отношения сигнал/помеха на выходе ЦЛАР, определяется соотношением [2]:

$$\mathbf{K}_o = \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{v}_c, \quad (2)$$

где \mathbf{R}_n – корреляционная матрица помеховых сигналов на выходах приёмных каналов ЦЛАР; \mathbf{v}_c – вектор, описывающий амплитудно-фазовое распределение поля в антенне (АФР) в ожидаемом направлении прихода сигнала (полезного сигнала);

При выполнении условия (2), устройство, обеспечивающее вычисление функции под знаком модуля, в (1), принято называть оптимальным пространственным фильтром [3].

Трудность практической реализации алгоритма (1) заключается, прежде всего, в том, что на выходах приёмных каналов ЦЛАР имеет место неразделимая смесь полезного сигнала и сигнала помехи, поэтому вычислить \mathbf{R}_n не представляется возможным. Использование же для вычисления \mathbf{K}_o корреляционной матрицы выходных сигналов приёмных каналов ЦЛАР \mathbf{R}_o , включающей в себя как помеховые, так и полезные сигналы, может привести к существенному снижению качества обнаружения при многоканальном адаптивном приёме сигналов [2]. В связи с этим возникла необходимость постановки сформулированной выше задачи.

Алгоритм Кейпона, упоминаемый в литературе часто, как один из алгоритмов высокого разрешения [3], при обнаружении сигнала, направление прихода которого совпадает с угловым положением максимума антенного луча РЛС, предусматривает вычисление функции вида:

$$z = \frac{1}{\mathbf{v}_c^H (\mathbf{R}_o^*)^{-1} \mathbf{v}_c}, \quad (3)$$

где $\mathbf{R}_o^* = n_o^{-1} \sum_{i=1}^{n_o} \mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_i^H$ – оценочная КМ размера $N \times N$ сигналов на выходах приёмных каналов

ЦЛАР; \mathbf{Y}_i – i -я дискретная выборка N -мерного вектора-столбца выходных сигналов приёмных каналов ЦЛАР, взятая по теореме Котельникова, $i \in \overline{1, n_o}$; $n_o > N$ – число дискретных выборок выходных сигналов приёмных каналов, используемых для оценки КМ сигналов на выходах приёмных каналов ЦЛАР. m -й элемент вектора \mathbf{v}_c для ЦЛАР с расстоянием между приёмными элементами, равным половине длины рабочей волны РЛС, определяется как $v_c^{(m)} = \exp(m-1) p \sin q_\mu$, $m \in \overline{1, N}$, $q_\mu \in [q_{\min}, q_{\max}]$; q_{\min} , q_{\max} – границы зоны обзора по азимуту или углу места, q_μ – угловая координата цели (источника полезного сигнала). С учётом (3) алгоритм обнаружения в обнаружителе на основе алгоритма Кейпона представляется следующим образом:

$$z = \frac{1}{\mathbf{v}_c^H (\mathbf{R}_o^*)^{-1} \mathbf{v}_c} \geq h_K \quad (4)$$

Функцию, определяемую выражением (3), в дальнейшем, для сокращения объёма записей будем называть функцией Кейпона.

Для обнаружителя на основе алгоритма Кейпона можно ввести понятие отношение сигнал/помеха q_K , определив его следующим образом:

$$q_K = \frac{z_{(c \neq 0)}}{z_{(c = 0)}}, \quad (5)$$

где обозначено: $z_{(c \neq 0)}$ – значение функции Кейпона при наличии сигнала цели на выходах приёмных каналов ЦЛАР; $z_{(c = 0)}$ – значение функции Кейпона при отсутствии сигнала цели на выходах приёмных каналов ЦЛАР.

Оценим предельное значение (5), полагая, что время оценки КМ выходных сигналов приёмных каналов достаточно для замены оценочной КМ на статистическую. После простейших матричных преобразований [4] получим:

$$z_{(c \neq 0)} = P_{c1} \cdot (1 + q_o^{-1}); \quad z_{(c = 0)} = (\mathbf{v}_o^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{v}_o)^{-1} \quad (6)$$

где P_{c1} – мощность сигнала цели на выходе приёмного канала ЦЛАР; $q_o = P_{c1} \mathbf{v}_o^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{v}_o$ – отношение сигнал/помеха (в классическом понимании этого термина) на выходе оптимального пространственного фильтра [5].

Учитывая, что для случаев, представляющих практический интерес, $q_o \gg 1$, после подстановки (6) в (5), получим:

$$q_K = q_o. \quad (7)$$

Из (7) следует, что предельное численное значение отношения сигнал/помеха для алгоритма Кейпона, определяемое соотношением (5), совпадает с предельным значением отношения сигнал/помеха на выходе оптимального пространственного фильтра.

Представим порог обнаружения в алгоритме (4) в виде:

$$h_K = \frac{h}{\mathbf{v}_c^H \mathbf{R}_o^{-1} \mathbf{v}_c}, \quad (8)$$

где h – коэффициент, значение которого выбирается из условия обеспечения заданного значения вероятности ложной тревоги при реализации алгоритма (4). С учётом (8), алгоритм (4) можно заменить равноценным, с точки зрения качества обнаружения, алгоритмом:

$$z = \frac{\mathbf{v}_c^H \mathbf{R}_o^{-1} \mathbf{v}_c}{\mathbf{v}_c^H (\mathbf{R}_o^*)^{-1} \mathbf{v}_c} \geq h. \quad (9)$$

Полагая, что собственные шумы приемных каналов ЦЛАР и сигналы внешних источников являются гауссовыми, можно утверждать [5], что левая часть выражения (6) имеет χ^2 распределение с $m = n_o - N + 1$ степенями свободы. При этом, если среднее значение (усреднение по ансамблю реализаций) элементов вектора Y_i равно нулю, то z подчиняется центральному распределению χ^2 , в противном случае z подчиняется не центральному распределению χ^2 .

В случае обнаружения сигналов цели имеет место второе условие (средние значения элементов вектора Y_i не равны нулю), поэтому для рассматриваемого в статье случая, плотность распределения вероятностей Z определяется соотношением [5]:

$$p(z) = \frac{z^{\frac{m}{2}-1} \exp[-(z+g)/2]}{2^{\frac{k}{2}} \sqrt{p}} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{g^r z^r \Gamma(1/2+r)}{\Gamma(2r+1) \Gamma(1/2m+r)}, \quad (10)$$

где g – параметр не центральности, $\Gamma(a)$ – гамма-функция.

С учётом результатов, полученных в [6], параметр не центральности для рассматриваемого случая равен

$$g = m \cdot q_1, \quad (11)$$

где q_1 – отношение сигнал/помеха на выходе оптимального пространственного фильтра.

Выражение (8) получено с учётом результатов, приведенных в [7].

Полагая, что число выборок, используемых для оценки КМ, совпадает с числом выборок полезного сигнала, с учётом (10), получаем формулу для расчёта вероятности правильного обнаружения квазидетерминированного сигнала при многоканальном приёме, когда используется обнаружитель на основе алгоритма Кейпона:

$$P_{\text{обнК}} = \exp(-g/2) \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(g/2)^r \Gamma[h/2, (m/2+r)]}{r! \Gamma(m/2+r)}, \quad (11)$$

где $\Gamma(z, b)$ – неполная гамма-функция;

значение порога обнаружения h , входящее в (9), определяется из выражения (9) для вероятности ложной тревоги, которое может быть получено с учётом (10), если положить в нём: $g = 0$.

$$P_{\text{лт}} = \frac{\Gamma(m/2, n_o/2 \cdot h)}{\Gamma(m/2)}, \quad (12)$$

Достоверность и правомочность использования формулы (11) подтверждена методом Монте-Карло. Результаты статистического моделирования обнаружителя на основе алгоритма Кейпона при большом числе независимых испытаний (порядка 500) хорошо согласуются с результатами расчёта по упомянутой выше формуле (рис. 1).

Зависимости на рис.1 соответствуют следующим исходным данным: число приёмных каналов ЦЛАР – $N = 10$; число выборок, используемых для оценки КМ – $n_o = 50$; число независимых испытаний при статистическом моделировании – $m_o = 10^3$. Отношение сигнал/помеха на рис.1 определено как $q = n_o q_1$ (здесь q_1 – отношение сигнал/помеха на выходе приёмного канала ЦЛАР).

Вероятность правильного обнаружения для алгоритма обнаружения (1) рассчитывалась по формуле для интегрального обобщенного закона Релея [6]:

$$P_{\text{обн1}} = 1 - \exp(-n_o q_o) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(n_o q_o)^k}{(m!)^2} \frac{1}{m!} \Gamma\left(\frac{h_o^2}{2}, (m+1)\right), \quad (13)$$

где $\Gamma(x, a)$ – неполная гамма-функция [7].

Результаты расчёта вероятностей обнаружения по формулам (11) и (13) представлены на рис. 1.

Кривая 1 соответствует оптимальному алгоритму обнаружения сигнала со случайной начальной фазой при многоканальном приёме, а кривая 2 соответствует обнаружителю на основе алгоритма Кейпона. Графики на рис.1 построены для следующих исходных данных: $N = 10$, $n_o = 50$.

Результаты расчёта вероятности обнаружения цели по формуле (7) полностью совпадают с результатами, приведенными в виде графиков кривых обнаружения, в [8].

Сравнение кривых обнаружения на рис. 1 позволяет сделать вывод, что при многоканальном приёме замена оптимального алгоритма объединения выходных сигналов приёмных каналов ЦЛАР на алгоритм Кейпона приводит к возникновению потерь в отношении сигнал/помеха. На рис.2 представлен график, иллюстрирующий зависимость этих потерь от отношения n_o/N при вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-4}$ и вероятности правильного обнаружения $P_{обн} = 0,8$.

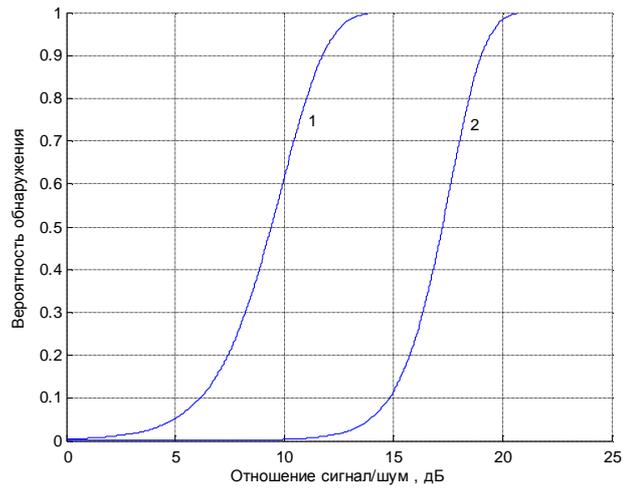


Рис. 1. Вероятность обнаружения

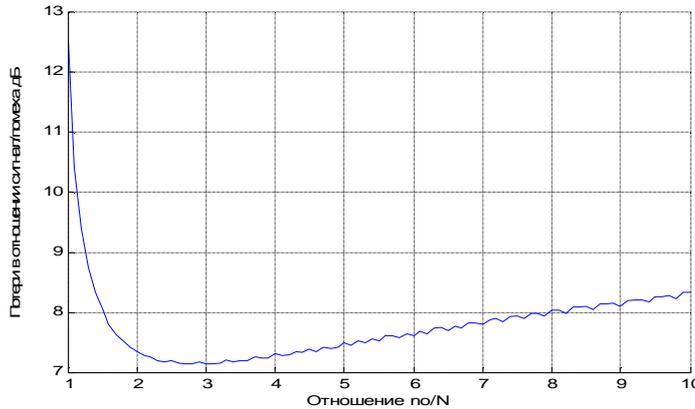


Рис. 2. Зависимость потерь

Резкое увеличение потерь в отношении сигнал/помеха при $n_o < 3N$ обусловлено, плохой обусловленностью оценочной КМ в (3). Об этом наглядно свидетельствует зависимость числа обусловленности гипотетической оценочной КМ от относительного объёма выборки, используемой для оценки последней, представленная на рис. 3. КМ от относительного объёма выборки

Число обусловленности оценочной КМ $cond(\mathbf{R}^*)$ на рис.3 определено как отношение

$$cond(\mathbf{R}^*) = I_{\max} / I_{\min}$$

где I_{\max} , I_{\min} – максимальное и минимальное собственные числа КМ соответственно.

Зависимость, обозначенная цифрой 1, на рис. 3 соответствует отношению сигнал/помеха на выходе приёмного канала ЦЛАР, равном 20 дБ, а зависимость 1, отношению сигнал/помеха, равном 10дБ.

На рис. 4 представлены зависимости, иллюстрирующие величину потерь в отношении сигнал/помеха для участка графика на рис.2, соответствующего удовлетворительной обусловленности оценочной КМ. Зависимость,

обозначенная цифрой 1, соответствует $P_{обн} = 0,8$, а цифрой 2 – $P_{обн} = 0.5$.

Выводы

1. В обнаружителе на основе алгоритма Кейпона полезным сигналом является значение функции Кейпона при совпадении амплитудно-фазового распределения, создаваемого источником сигнала большой

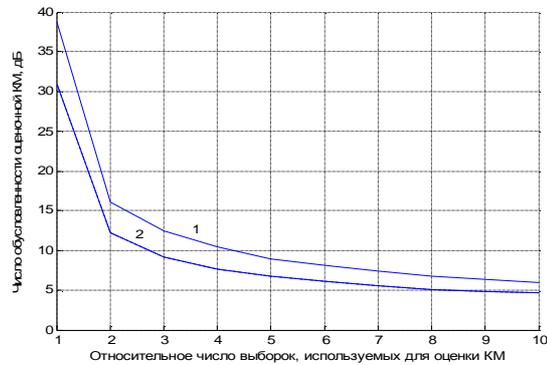


Рис. 3. Зависимость числа обусловленности гипотетической оценочной

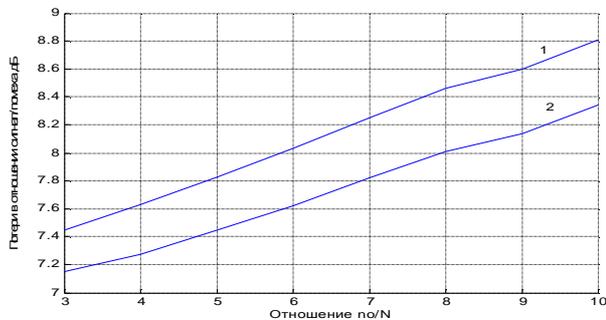


Рис. 4. Зависимость потерь в отношении сигнал/помеха

длительности, на выходах приёмных каналов ЦЛАР с ожидаемым амплитудно-фазовым распределением, на которое “настроен” обнаружитель. При этом значение функции Кейпона с точностью до величины, обратной к отношению сигнал/помеха на выходе оптимального пространственного фильтра равно мощности сигнала упомянутого выше источника на выходе приёмного канала ЦЛАР.

2. Мешающим сигналом (помехой) в обнаружителе на основе алгоритма Кейпона является значение функции Кейпона при отсутствии источника сигнала на контролируемом направлении.

3. Отношение амплитуды полезного сигнала к амплитуде мешающего сигнала в обнаружителе на основе алгоритма Кейпона совпадает с предельно достижимым отношением сигнал/помеха на выходе оптимального пространственного фильтра. Это означает, что обнаружитель Кейпона максимизирует отношение значения функции Кейпона, обусловленного наличием источника сигнала на контролируемом направлении к значению этой же функции при отсутствии выше упомянутого источника.

4. При использовании алгоритма Кейпона для объединения выходных сигналов приёмных каналов ЦЛАР отпадает необходимость в разделении КМ помех и сигналов цели, однако, при этом возникают потери в отношении сигнал/помеха. Величина этих потерь зависит от заданного значения вероятности правильного обнаружения $P_{обн}$ и отношения n_o/N .

5. При использовании алгоритма Кейпона минимальные потери в отношении сигнал/помеха имеют место при $n_o = 3N$;

6. Причиной резкого увеличения потерь при $n_o < 3$ является ухудшение обусловленности оценочной КМ, при $n_o > 3$ потери увеличиваются за счёт замены когерентного накопления $n_o \cdot N$ выборок полезного сигнала, имеющего место в случае оптимального алгоритма объединения выходных сигналов приёмных каналов ЦЛАР, на не когерентное, в случае использования алгоритма Кейпона.

Литература

1. Ширман Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и Связь, 1981. – 416 с.
2. Бондаренко Б. Ф. Защита информационной системы с цифровой антенной решёткой и рабочим сигналом большой длительности от активных помех, создаваемых внешними источниками / Б. Ф. Бондаренко, К. М. Семибаламут // Радиоэлектроника.
3. Кейпон Дж. Пространственно-временной спектральный анализ с высоким разрешением / Дж. Кейпон // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66. – № 1. – С. 60–96.
4. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решётки / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. – М. : Радио и связь, 1986. – 448 с.
5. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применения / Рао С. Р. – М. : Наука, 1968. – 548 с.
6. Янке Е. Специальные функции / Е. Янке, Ф. Энде, Ф. Лёш. – М. : Наука, 1964. – 344 с.
7. Бартон Д. Радиолокационные системы / Бартон Д. – М. : МО СССР, 1967. – 480 с.
8. Заездный А. М. Основы расчётов по статистической радиотехнике Заездный А. М. – М. : Связь, 1969. – 447 с.
9. Хорн Р. Матричный анализ / Р. Хорн, Ч. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 655 с.
10. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применения / Рао С. Р. – М. : Наука, 1968. – 548 с.
11. Бондаренко Б. Ф. Сравнительная оценка эффективности обнаружителей шумовых сигналов на основе алгоритма Кейпона и оптимального алгоритма / Б. Ф. Бондаренко, И. Н. Сашук, В. Ю. Тымчук // Радиоэлектроника. – 2004. – № 3. – С. 35–41.

Надійшла 18.9.2011 р.

УДК 621.785.532

Ю.І. ШАЛАПКО

Хмельницький національний університет

Ю.І. ПАВЛИШЕН

Хмельницька обласна клінічна лікарня

Я. ЦВАНЕК

Департамент реабілітації, Жешувська Політехніка, Польща

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЕНДОПРОТЕЗІВ

В статті досліджено питання зносостійкості матеріалів для ендопротезів.

The article explored the issue of wear resistance of materials for endoprotheses.

Ключові слова: медична апаратура і технології, відновлювальна медицина, травматологія.

Вступ

Проблема міцності імплантованих матеріалів й відповідних конструкцій об'єднані в широке коле