

УДК 621.396

*Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, К. В. Власова*

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА И МЕТОДА  
МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ  
ПРИ ПРИЕМЕ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ  
НА ОСНОВЕ КОДОВ БАРКЕРА**

*Приведены результаты модельных исследований разрешающей способности корреляционного метода и метода максимального правдоподобия при приеме двух радиозондирующих сигналов на основе 13-позиционных кодов Баркера, выполненных в среде MATLAB. В основе модельных исследований лежат выражения, полученные авторами работы в рамках теории оптимального приема и позволяющие проводить совместную оценку одноименных параметров двух сигналов, а также осуществлять их разрешение по данным параметрам.*

*This article presents the results of a MATLAB-assisted study into the maximum likelihood method resolution in the reception of two radioprobing signals based on Barker's codes. The study is based on the expressions obtained by the authors within optimum reception theory that make it possible to carry out a joint evaluation of the same parameters of two signals and resolve them based on these parameters.*

**Ключевые слова:** фазоманипулированный сигнал, код Баркера, корреляционный анализ, метод максимального правдоподобия, разрешающая способность.

**Key words:** phase-shift keying signal, Barker's code, correlation analysis, maximum likelihood method, resolution.



В радиолокации при одновременном приеме сигналов от нескольких близко расположенных целей актуальной становится задача разрешения таких сигналов и оценка их параметров на фоне интенсивных шумов. Данная задача может быть решена в рамках двух направлений: методом корреляционного анализа [1] и методом максимального правдоподобия [2]. В работе представлены результаты сравнительной оценки разрешающей способности двух данных методов по таким параметрам радиозондирующего сигнала, как амплитуда и время приема.

В работе [3] получены основные выражения, позволяющие проводить совместную оценку одноименных параметров двух сигналов и тем самым осуществлять их разрешение по данным параметрам в рамках теории оптимального приема. Ниже представлены результаты модельных исследований разрешающей способности рассматриваемых методов при приеме двух радиозондирующих сигналов на основе 13-позиционных кодов Баркера, выполненных в среде MATLAB.

В качестве математической модели принимаемого сигнала была выбрана аддитивная смесь двух фазоманипулированных сигналов на основе 13-позиционного кода Баркера и белого гауссова шума. Длительность кодовой последовательности составляла 390 мкс, длительность одной позиции 30 мкс, шаг дискретизации был равен 0,2 мкс, несущая частота 456 кГц, начальные фазы первого и второго сигналов составляли  $0^\circ$  и  $50^\circ$  соответственно, а амплитуды первого и второго сигналов — 2 и 1,5 В соответственно. Разность времен приема двух сигналов менялась от 2 до 40 мкс.

Оценка параметров радиозондирующих сигналов рассматриваемыми методами проводилась в зависимости от разности времен приема этих сигналов при трех различных отношениях сигнал/шум. На рисунке 1 представлены графические зависимости полученных оценок времен приема и амплитуд обоих сигналов при отношении сигнал/шум 30 дБ в рамках метода максимального правдоподобия. Как следует из графиков, оценочные значения параметров соответствуют модельным данным даже при минимальном различии времен приема в 2 мкс.

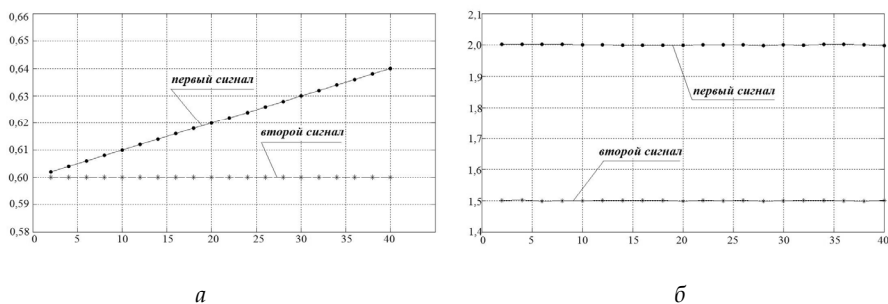


Рис. 1. Графические зависимости оценок времен приема (а) и амплитуд двух сигналов в смеси (б) при отношении сигнал/шум 30 дБ, полученные методом максимального правдоподобия: по оси абсцисс отложена разность времен приема в мкс; по оси ординат — время приема в мкс (а) или амплитуда радиосигнала в В (б)



На рисунке 2 приведены аналогичные зависимости, полученные с помощью корреляционного анализа при том же отношении сигнал/шум.

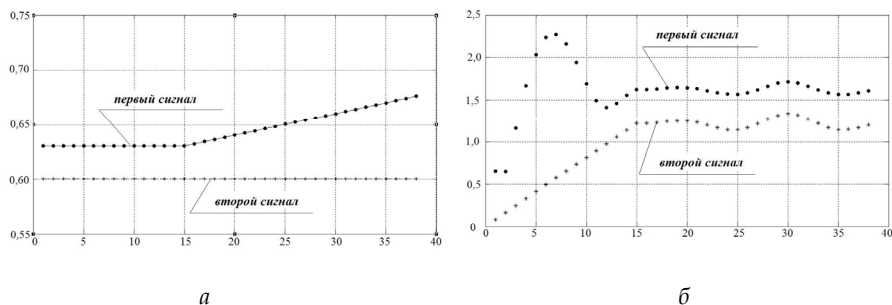


Рис. 2. Графические зависимости оценок времен приема (а) и амплитуд двух сигналов в смеси (б) при отношении сигнал/шум 30 дБ, полученные методом корреляционного анализа: по оси абсцисс отложена разность времен приема в мкс; по оси ординат — время приема в мкс (а) или амплитуда радиосигнала в В (б)

Результаты показывают, что при значениях разности времен приема меньше 30 мкс корреляционный анализ не дает достоверных оценок времени приема второго сигнала. Оценки амплитуд первого и второго сигналов в указанной области также характеризуются большой величиной дисперсии. Таким образом, метод максимального правдоподобия дает существенный выигрыш в разрешении двух радиозондирующих сигналов по времени приема — 28 мкс — при заданном отношении сигнал/шум, то есть порядка длительности одной позиции.

На рисунках 3–6 представлены результаты модельных исследований разрешающей способности корреляционного анализа и метода максимального правдоподобия при 0 и -10 дБ.

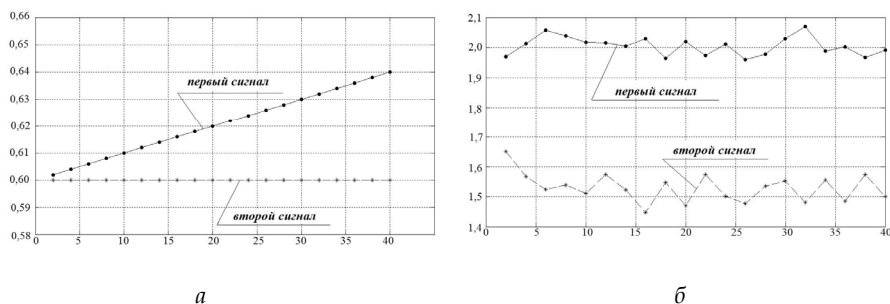


Рис. 3. Графические зависимости оценок времен приема (а) и амплитуд двух сигналов в смеси (б) при отношении сигнал/шум 0 дБ, полученные методом максимального правдоподобия: по оси абсцисс отложена разность времен приема в мкс; по оси ординат — время приема в мкс (а) или амплитуда радиосигнала в В (б)

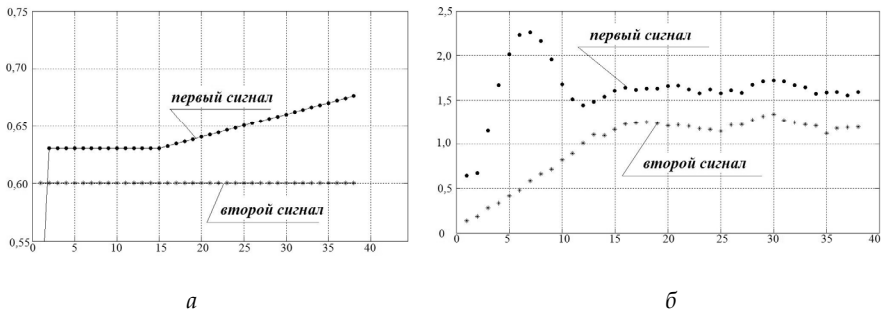


Рис. 4. Графические зависимости оценок времен приема (а) и амплитуд двух сигналов в смеси (б) при отношении сигнал/шум 0 дБ, полученные методом корреляционного анализа: по оси абсцисс отложена разность времен приема в мкс; по оси ординат — время приема в мкс (а) или амплитуда радиосигнала в В (б)

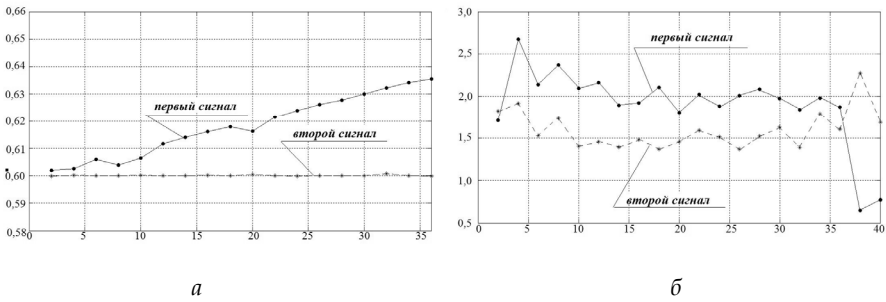


Рис. 5. Графические зависимости оценок времен приема (а) и амплитуд двух сигналов в смеси (б) при отношении сигнал/шум - 10 дБ, полученные методом максимального правдоподобия: по оси абсцисс отложена разность времен приема в мкс; по оси ординат — время приема в мкс (а) или амплитуда радиосигнала в В (б)

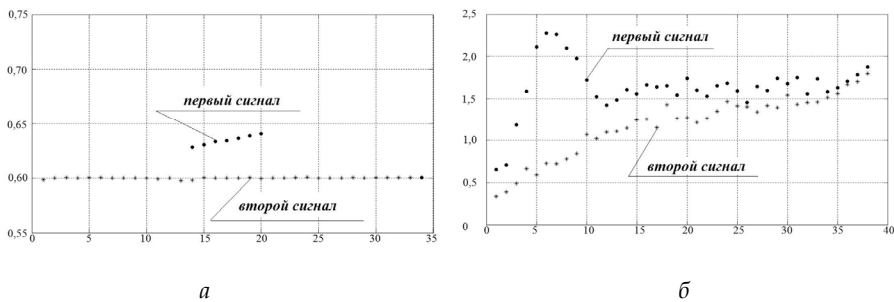


Рис. 6. Графические зависимости оценок времен приема (а) и амплитуд двух сигналов в смеси (б) при отношении сигнал/шум - 10 дБ, полученные методом корреляционного анализа: по оси абсцисс отложена разность времен приема в мкс; по оси ординат — время приема в мкс (а) или амплитуда радиосигнала в В (б)



При отношении сигнал/шум 0 дБ метод максимального правдоподобия характеризуется той же разрешающей способностью по времени приема, но дает небольшие осцилляции оценок амплитуд сигналов, не превышающие 5 % от модельных значений. При этом оценки, полученные в рамках корреляционного анализа, остаются теми же, что и при 30 дБ.

При уменьшении отношения сигнал/шум до значения – 10 дБ в оценках, полученных методом максимального правдоподобия, наблюдается увеличение осцилляций вокруг модельных значений, которые составляют около 4 мкс для времени приема второго сигнала и от 10 % (для максимального разнесения сигналов по времени приема) до 30–35 % (для минимального разнесения сигналов по времени приема). Полученный вывод накладывает ограничения на возможность применения данного метода при столь низких отношениях сигнал/шум.

Значения оценки времени приема второго сигнала, полученные с помощью корреляционного анализа, определены лишь в узком диапазоне значений разности времен приема сигналов: от 28 до 40 мкс, — что может быть объяснено результатом интерференции рассматриваемых сигналов. Значения оценки амплитуды первого сигнала в достаточно широком диапазоне разности времен приема сигналов колеблются вокруг среднего значения порядка 1,6 В, что сильно отличается от заданного значения в 2 В. При уменьшении разности времен приема ниже 25 мкс среднее квадратическое отклонение полученной оценки значительно возрастает. Оценка амплитуды второго сигнала при разности времен приема меньше 50 мкс практически линейно спадает, отклоняясь от заданного значения в 1,5 В максимум на 75 %. Таким образом, решение задачи разрешения двух радиозондирующих сигналов методом корреляционного анализа не может быть получено при столь низком отношении сигнал/шум.

*Работа выполнена в соответствии с техническим заданием на НИР в рамках государственного задания № БГАРФ4-2013/ГБ\_2 по теме «Разработка эффективных алгоритмов обработки сигналов в судовых локационных и навигационных устройствах».*

### Список литературы

1. Пахотин В. А., Бессонов В. А., Молостова С. В., Власова К. В. Курс лекций для радиофизических специальностей. Калининград, 2008.
2. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем : учебное пособие для вузов. М., 2003.
3. Разработка эффективных алгоритмов обработки сигналов в судовых локационных и навигационных устройствах : отчет о НИОКР (промеж.) / БГАРФ ФГБОУ ВПО КГТУ ; рук. Е. В. Волхонская. Калининград, 2014.

### Об авторах

Елена Вячеславовна Волхонская — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.  
E-mail: volkhonskaya\_e@mail.ru



Евгений Владимирович Коротей – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: eugeny\_korotey@mail.ru

Ксения Валерьевна Власова – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: p\_ksenia@mail.ru

#### **About the authors**

Prof. Elena Volkhonskaya, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: volkhonskaya\_e@mail.ru

Evgeny Korotey, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: eugeny\_korotey@mail.ru

Dr Kseniya Vlasova, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: p\_ksenia@mail.ru