

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА СОВМЕСТНОГО ПРИЁМА СИГНАЛОВ И ОЦЕНКИ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ С ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В ИНФОРМАЦИОННОМ ПОЛЕ

А.С. Кузнецов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В работе проведено исследование эффективности разработанного алгоритма совместного приёма сигналов и оценки навигационных параметров для систем связи с подвижными объектами, функционирующих в информационном поле на основе мультимарково-полигауссовой модели. Путём компьютерного моделирования получены результаты сравнения достоверности полученных оценок квадратур сигналов и среднеквадратическое отклонение оценок координат разработанного алгоритма и моногауссового алгоритма Винеровской фильтрации.

Ключевые слова: информационное поле, совместный приём, позиционирование объектов, корреляционный приём, полигауссовы методы и алгоритмы.

Введение

В настоящее время важным функциональным элементом большинства существующих систем связи с подвижными объектами является возможность определения местоположения устройств сети. Для решения этой задачи с высокой точностью применяются спутниковые радионавигационные системы (СРНС). Однако в связи с различными факторами и условиями (атмосферные явления, сложные топографические объекты и их расположение, помехи различных классов и прочее) сигналы СРНС могут быть искажены или недоступны в зоне покрытия сетей связи. В связи с этим логично рассмотреть возможность использования сигналов самих систем связи с подвижными объектами для точного позиционирования путём реализации процедур совместного приёма этих сигналов и использования принципов концепции информационного поля (ИП) [1].

При решении этой задачи были разработаны методы и алгоритмы совместного приёма и позиционирования по сигналам систем связи, функционирующих в информационном поле [2].

Оценка эффективности полученных решений

Для исследования эффективности разработанных методов и алгоритмов первоначально была осуществлена техническая реализация стенда для исследования сигналов информационного поля, разработка которого подробно рассмотрена в работах [3 – 5]. В связи с текущими техническими ограничениями стенд был реализован в лаборатории 509 им. В.Р. Линдваля на кафедре радиоэлектронных и телекоммуникационных систем ИРЭФ-ЦТ КНИТУ-КАИ в ультразвуковом диапазоне на базе программно-аппаратной платформы National Instruments (рис. 1).

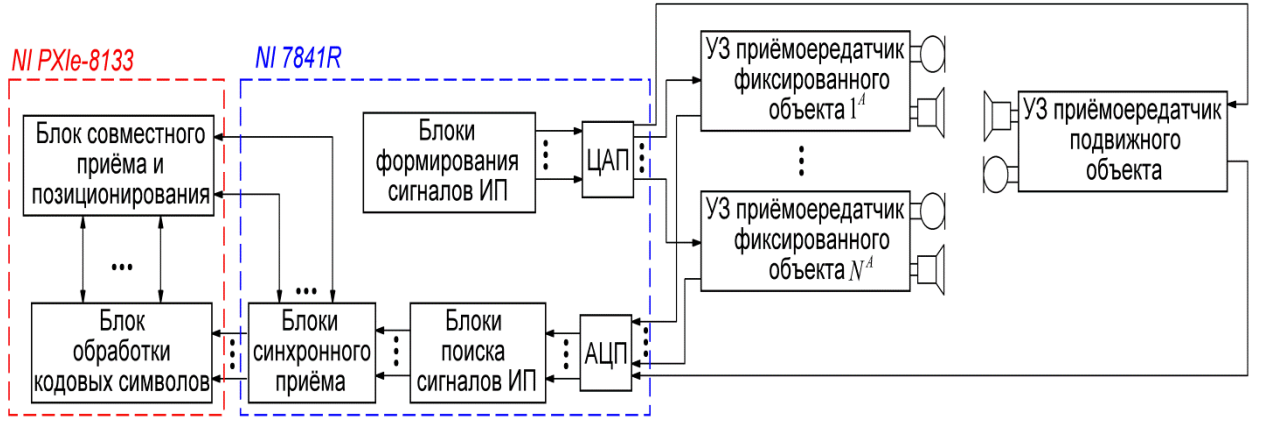


Рис. 1. Структурная схема стенда для исследования сигналов информационного поля

Разработке блоков формирования, поиска, синхронного приёма, обработки сигналов ИП посвящены работы [4 – 6], блока совместного приёма и позиционирования работы [2, 7], а разработке ультразвуковых приёмопередатчиков работа [3].

Для оценки эффективности проведём моделирование работы стенда, с использованием разработанного мультимарково-полигауссова (ММ-ПГ) [8] алгоритма [2] и моногауссового алгоритма Винеровской фильтрации. Для получения оценок квадратур сигналов на компонентном уровне ММ-ПГ модели реализуется набор фильтров Калмана, каждый из которых осуществляет предсказание по соответствующим направлениям движения. Уравнение наблюдения фильтра Калмана определяется как (1):

$$\overline{IQ}_k = \mathbf{h}_k \vec{A}_k^i + \vec{n}_k^i, \quad (1)$$

где $\overline{IQ}_k = (I_{kP}^{1^A}, Q_{kP}^{1^A}, I_{kE}^{1^A}, Q_{kE}^{1^A}, I_{kL}^{1^A}, Q_{kL}^{1^A}, \dots, I_{kP}^{N^A}, Q_{kP}^{N^A}, I_{kE}^{N^A}, Q_{kE}^{N^A}, I_{kL}^{N^A}, Q_{kL}^{N^A})^T$ – вектор значений точных (P), ранних (E) и поздних (L) квадратур [9] от N^A объектов на интервале приёма k -го кодового символа, $\vec{A}_k^i = (\hat{I}_{kP}^{1^A}, \hat{Q}_{kP}^{1^A}, \hat{I}_{kE}^{1^A}, \hat{Q}_{kE}^{1^A}, \hat{I}_{kL}^{1^A}, \hat{Q}_{kL}^{1^A}, \dots, \hat{I}_{kP}^{N^A}, \hat{Q}_{kP}^{N^A}, \hat{I}_{kE}^{N^A}, \hat{Q}_{kE}^{N^A}, \hat{I}_{kL}^{N^A}, \hat{Q}_{kL}^{N^A})^T$ – вектор оценок квадратур i -й взвешенной компоненты от N^A объектов на интервале приёма k -го кодового символа, \mathbf{h}_k – матрица корреляционных соотношений векторов пилот-сигналов на интервале приёма k -го кодового символа, \vec{n}_k^i – вектор отсчётов аддитивного белого гауссовского шума с плотностью $W(\vec{n}_k^i) = \frac{1}{\sqrt{(2 \cdot \pi \cdot \sigma_k^2)^{6 \cdot N^A}}} \exp\left(-\frac{(\vec{n}_k^i)^2}{2 \cdot \sigma_k^2}\right)$.

Уравнение состояния для элементарных компонент \vec{A}_k^{ij} описывается как (2):

$$\vec{A}_k^{ij} = \mathbf{B}_k^j \cdot (\vec{A}_{k-1}^i + \vec{U}_k) + \vec{\mu}_k^{ij}, \quad (2)$$

где \mathbf{B}_k^j – матрица предсказания для j -го направления движения, $\vec{U}_k = (U_{kP}^{1^A}, U_{kQ_P}^{1^A}, U_{kE}^{1^A}, U_{kQ_E}^{1^A}, U_{kL}^{1^A}, U_{kQ_L}^{1^A}, U_{kP}^{2^A}, \dots, U_{kQ_L}^{N^A})^T$ – вектор отсчётов управляющего воздействия, $\vec{\mu}_k^{ij}$ – формирующий шум, с ковариационной матрицей \mathbf{D}_k^j .

В случае же моногауссового алгоритма Винеровской фильтрации матрица предсказания является единичной.

Для проведения компьютерного моделирования оба алгоритма были реализованы в среде Matlab. Пассивный объект размещается в центре лаборатории и первоначально он неподвижен. После начальной синхронизации, осуществлявшейся в неподвижном случае, объект начинает прямолинейное движение с постоянной скоростью. Движение осуществляется на длине 19000 кодовых символов. Интервал приёма одного кодового символа равен 25,6 мс. Матрицы дисперсий шума измерений и формирующего шума фильтра Винера и ММ-ПГ алгоритма оцениваются с использованием алгоритма адаптации [8]. Рассмотрим фрагмент результатов фильтрации (красным) точной квадратуры и её измерений (зелёным) предложенными алгоритмами в случае начала движения (рис. 2).

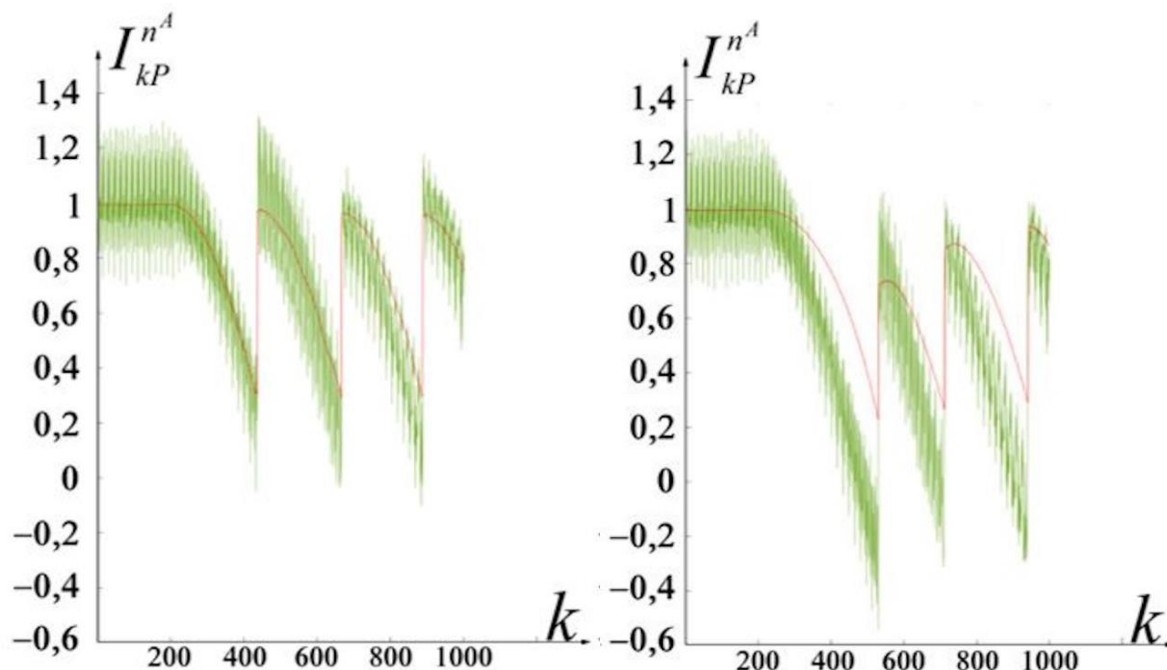


Рис. 2. Измерения «точных» квадратур $I_{kp}^{n^A}$ (зелёным) и их оценки $\hat{I}_{kp}^{n^A}$ (красным) для алгоритма ММ-ПГ (а) и Винера (б)

Стоит отметить, что заметный «шум» измерений возникает по причине внутрисистемных помех, создаваемых объектами, формирующими информационное поле, а причиной скачкообразных изменений измерений и оценок является выработка управляющего воздействия \vec{U}_{k+1} , когда оценка фазы $\varphi_k^{n^A}$ становится по модулю больше значения эквивалентного смещению на один отсчёт несущей сигнала.

Как видно из рис. 2 оценки квадратур фильтра Винера обладают большой погрешностью. Это объясняется тем, что при адаптации на неподвижном участке оцениваемые значения матрицы дисперсии формирующего шума становятся крайне малыми, что влечёт за собой увеличение инерционности фильтра. Большая погрешность оценки квадратур приводит к снижению достоверности оценок сигнальных параметров, а, следовательно, и существенное увеличение вероятности битовой ошибки.

Алгоритм ММ-ПГ в свою очередь не обладает указанным недостатком, несмотря на то, что на неподвижном участке значения матрицы дисперсии формирующего шума для гипотезы о неподвижном объекте сравнимы с аналогичной матрицей фильтра Винера. Однако при этом матрицы дисперсий формирующего шума остальных гипотез остаются достаточными для реакции на динамичное движение объекта.

Кроме того, погрешность оценки сигнальных параметров, наблюдаемая на выходе фильтра Винера, влечёт за собой и рост погрешности навигационных параметров (рис. 3).

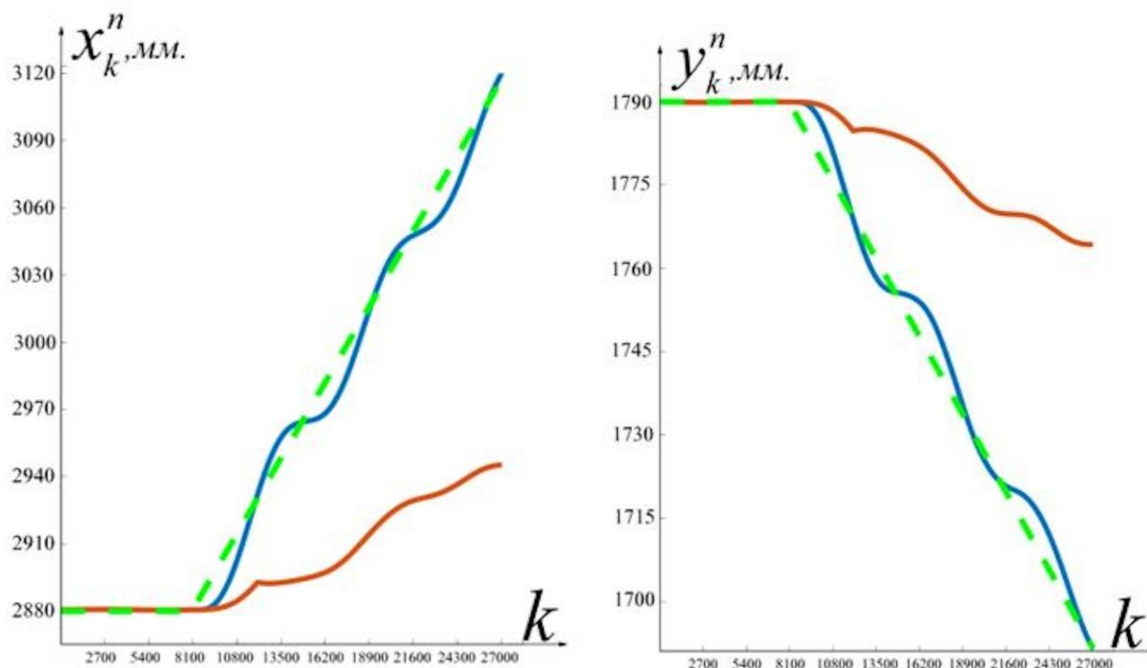


Рис. 3. Оценки координат x_k^n (а) и y_k^n (б) по ММ-ПГ модели (синим), по фильтру Винера (красным) и истинное значение (зелёным)

Как видно из рис. 3 на интервале приёма каждого кодового символа увеличивается отклонение координат от истинного значения, что, в конце концов, приведёт к срыву слежения, как за сигнальными, так и за навигационными параметрами.

Решением этой проблемы является ввод нижнего порога для матрицы дисперсии формирующего шума фильтра Винера. Фрагмент результатов фильтрации и их подробное сравнение в этом случае приведены на рис. 4 и 5.

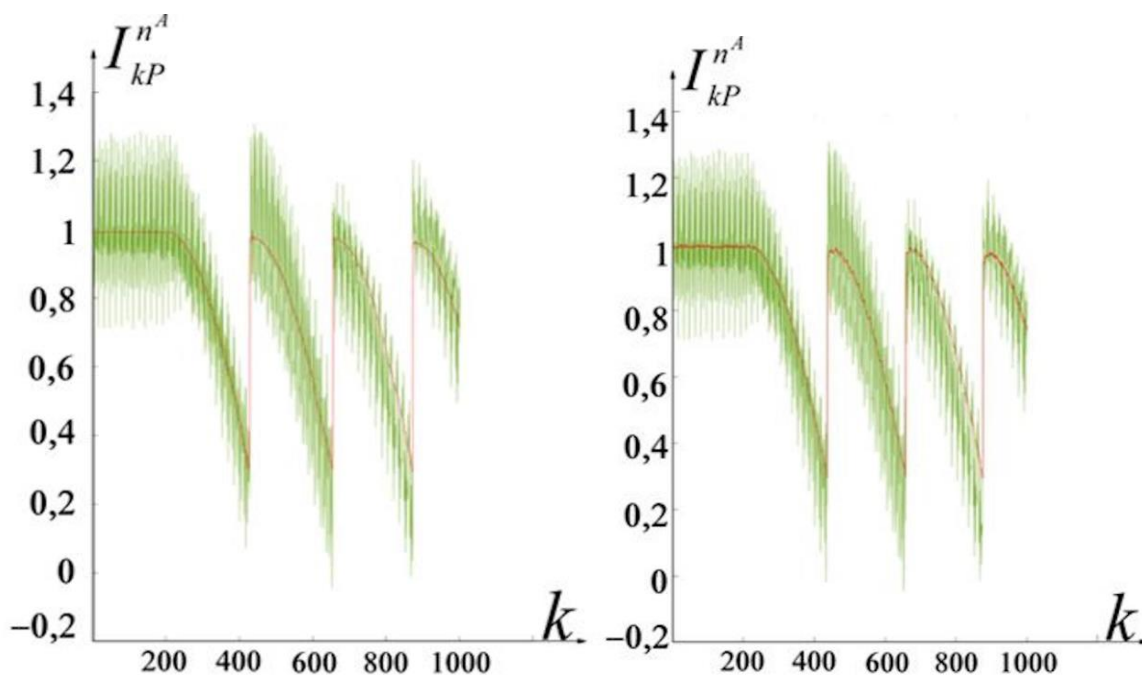


Рис. 4. Измерения «точных» квадратур $I_{kP}^{n^A}$ (зелёным) и их оценки $\hat{I}_{kP}^{n^A}$ (красным) для алгоритма ММ-ПГ (а) и Винера (б)

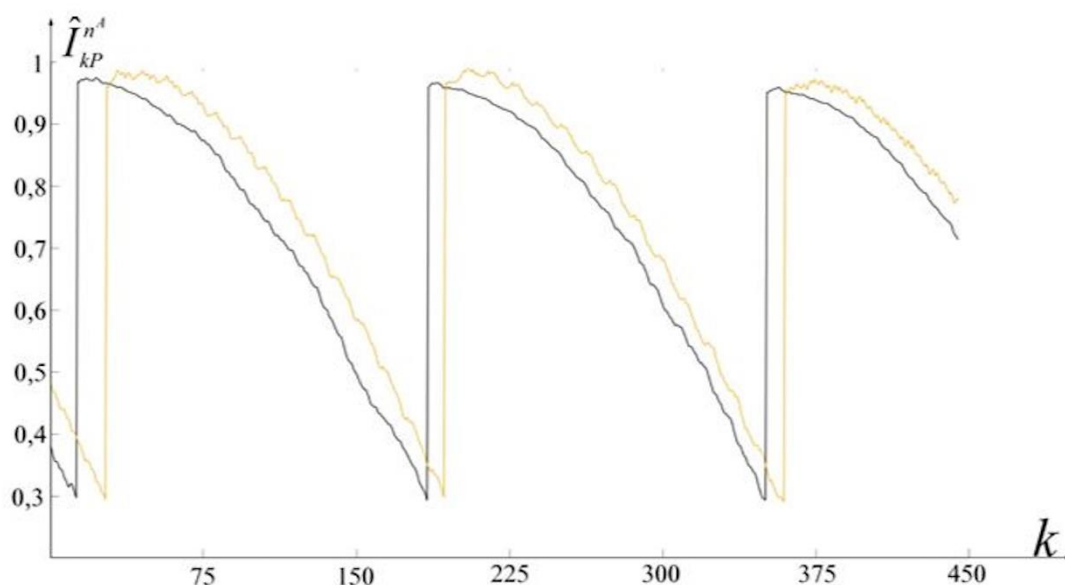


Рис. 5. Оценки «точных» квадратур $\hat{I}_{kp}^{n^A}$ на подвижном участке по ММ-ПГ модели (чёрным) и фильтру Винера (рыжим)

При введении нижнего порога для фильтра Винера не наблюдается срыва слежения за сигнальными и навигационными параметрами. Однако, как следует из рис. 5, оценки фильтра Винера «запаздывают» относительно оценок, получаемых алгоритмом на базе ММ-ПГ модели. Это объясняется тем, что фильтр Винера обладает единичной матрицей предсказания. Кроме того, вследствие введения порога оценки фильтра Винера имеют еще и больший уровень шума.

Запаздывание оценок фильтра Винера приводит к «запаздыванию» оценок координат (рис. 6).

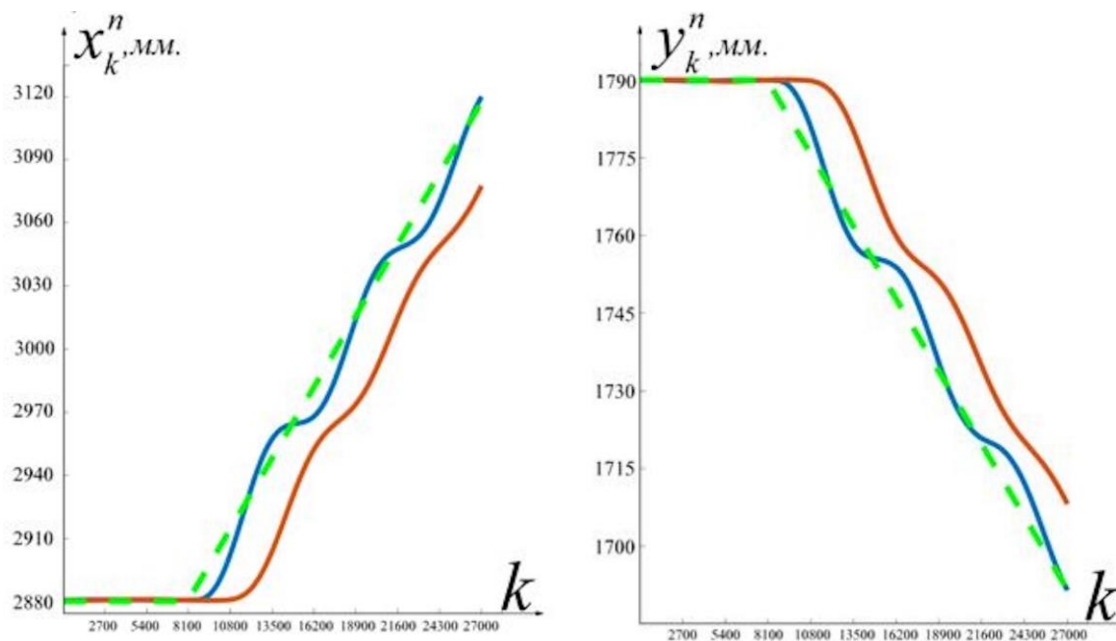


Рис. 6. Оценки координат x_k^n (а) и y_k^n (б) по ММ-ПГ модели (синим), по фильтру Винера (красным) и истинное значение (зелёным)

Корректно выбранная величина порога позволяет сохранять постоянными величины отклонения оценок координат, однако важно иметь в виду, что каждый манёвр объекта

(изменение угла направления движения, остановка и пр.) будет увеличивать на некую величину отклонение оценок координат.

Далее необходимо оценить и сравнить достоверность оценок, получаемых моделями ММ-ПГ и Винера при различных отношениях сигнал-шум (ОСШ) на отрезке $[-10, 40]$ дБ с шагом 5 дБ. Для этого вычислим на интервале приёма каждого кодового символа отношения правдоподобий $\vec{W}_{\text{ММ-ПГ}}, \vec{W}_{\text{Винер}}$ оценок, полученных моделями ММ-ПГ

и Винера соответственно, а после найдём среднее отношений этих величин $\beta = \left(\frac{\vec{W}_{\text{ММ-ПГ}}}{\vec{W}_{\text{Винер}}} \right)$.

Величина β показывает во сколько раз оценки, полученные ММ-ПГ моделью, достовернее оценок, полученных моделью Винера. Полученные по результатам моделирования значения β приведены на рис. 7.

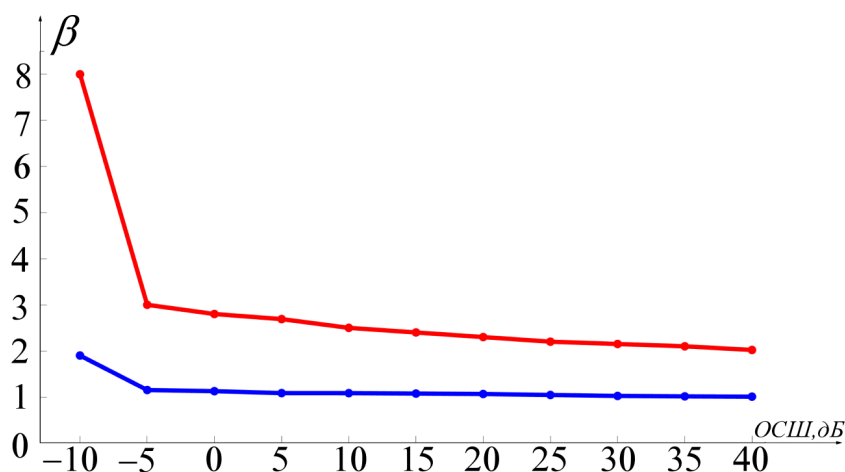


Рис. 7. Зависимость величины β от ОСШ в случаях неподвижного (синим) и подвижного (красным) объекта

По результатам моделирования видно, что применение ММ-ПГ модели позволяет более чем в 2 раза повысить достоверность оценки параметров сигналов. Рассмотрим изменение β во времени в случае, когда первоначально объект неподвижен, а после движется в соответствии с условиями моделирования (рис. 8), поскольку на отрезке $[-5, 40]$ дБ β меняется незначительно, то приведём её значения при ОСШ 10 дБ.

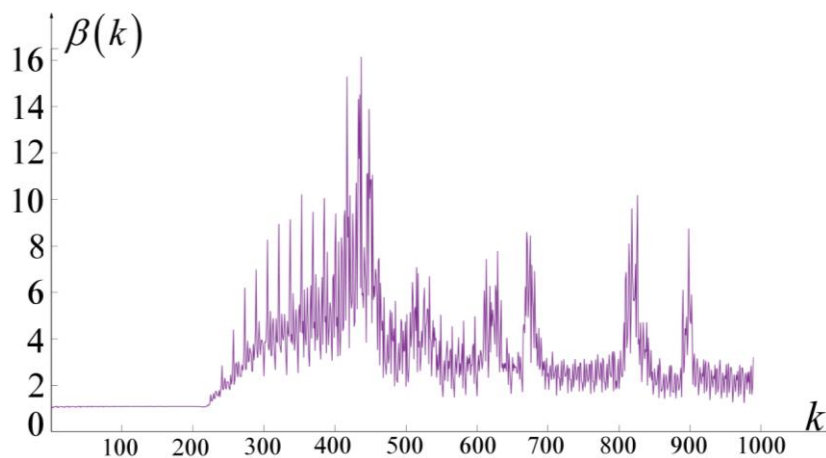


Рис. 8. Изменение величины β во времени

Как следует из приведенного на рис. 8 графика, алгоритм на базе ММ-ПГ обеспечивает выигрыш по отношению правдоподобия по сравнению с фильтром Винера в 2 – 16 раз.

Оценим эффективность применения моделей при решении навигационной задачи. Для этого в случае подвижного объекта на интервале приёма каждого кодового символа будем вычислять среднеквадратическое отклонение (СКО) оценок координат, значения которых усредним на длине всей «подвижной» реализации. Значения СКО оценок координат также получены при различных отношениях сигнал-шум (ОСШ) по результатам 100 опытов на отрезке $[-10, 40]$ дБ с шагом 5 дБ (рис. 9).

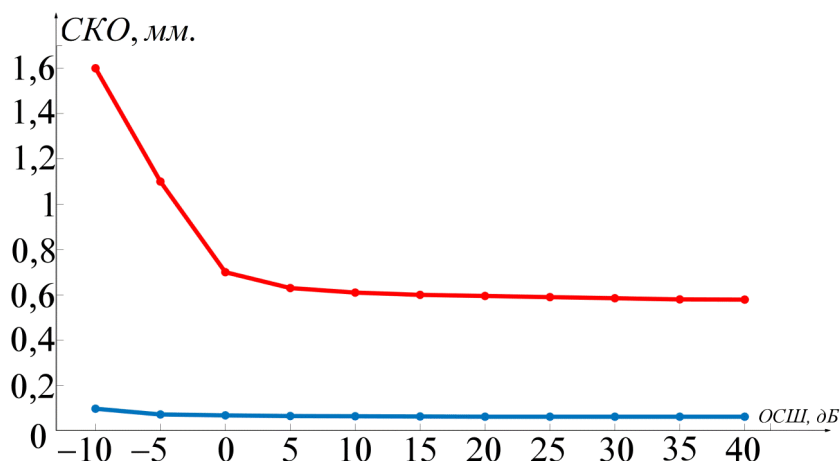


Рис. 9. Зависимость СКО оценок координат от ОСШ. Синим – ММ-ПГ, красным – Винер

По результатам моделирования видно, что применение ММ-ПГ модели позволяет более чем в 9 раз снизить СКО оценок координат. Резкий рост СКО оценок координат при ОСШ менее 0 дБ объясняется «неустойчивостью» фильтра Винера при данных величинах шума измерения.

Заключение

Проведено исследование эффективности разработанного алгоритма совместного приёма сигналов и оценки навигационных параметров для систем связи с подвижными объектами, функционирующих в информационном поле на основе ММ-ПГ модели. Путём компьютерного моделирования получены результаты при сравнении достоверности полученных оценок и СКО оценок координат разработанного алгоритма и моногауссового алгоритма Винеровской фильтрации.

Полученные результаты позволяют сделать выводы, что для подвижного объекта при отношении сигнал-шум более -10 дБ применение ММ-ПГ модели позволило:

1. Повысить достоверность оценок более чем в 2 раза;
2. Существенно снизить СКО оценок координат более чем в 9 раз.

Список литературы

1. Спирина, Е. А. Распределение потоков информации систем, работающих в информационном поле / Е. А. Спирина, Ш. М. Чабдаров // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2019. – № 4(44). – С. 6-15. – DOI 10.25686/2306-2819.2019.4.6.
2. Кузнецов, А. С. Расширение функционала систем связи с подвижными объектами, работающих в информационном поле / А. С. Кузнецов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2025. – № 1(65). – С. 34-45. – DOI 10.25686/2306-2819.2025.1.34.
3. Кузнецов, А. С. Разработка приёмопередающей части системы связи, работающей в информационном поле / А. С. Кузнецов // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Материалы Международной молодёжной научной конференции. В 6-ти томах, Казань, 07–08 ноября 2019 года. Том V. – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 375-379.
4. Кузнецов, А. С. Применение информационного поля для навигации объектов / А. С. Кузнецов, С. В. Козлов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 3(51). – С. 31-40. – DOI 10.25686/2306-2819.2021.3.31.
5. Кузнецов, А. С. Тестирование применения информационного поля для навигации объектов / А. С. Кузнецов, С. В. Козлов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 4-10. – DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-4-4-10.
6. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ №2025664138. Программа формирования, передачи и приёма сигналов информационного поля: №2025662806: заявл. 22.05.2025: опубл. 03.06.2025 / С.В. Козлов, А.С. Кузнецов; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ». – 1 с.
7. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ №2025665772. Программа совместного приёма и позиционирования по сигналам систем, работающих в информационном поле: №2025662841: заявл. 22.05.2025: опубл. 19.06.2025 / С.В. Козлов, А.С. Кузнецов; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ». – 1 с.
8. Козлов, С. В. Новые смесевые подходы к проектированию радиоинтерфейса систем связи / С. В. Козлов. – Казань : ООО "Новое знание", 2014. – 132 с. – ISBN 978-5-906668-26-4.
9. ГЛОНАСС : Модернизация и перспективы развития / Р. В. Бакитько, В. В. Дворкин, С. Н. Карутин [и др.]. – Москва : Издательство "Радиотехника", 2020. – 1072 с. – ISBN 978-5-93108-198-4. – DOI 10.18127/B9785931081984.

RESEARCH OF EFFICIENCY OF THE ALGORITHM OF JOINT RECEPTION OF SIGNALS AND ESTIMATION OF NAVIGATION PARAMETERS FOR COMMUNICATION SYSTEMS WITH MOBILE OBJECTS OPERATING IN THE INFORMATION FIELD

A.S. Kuznetsov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. A research study has been conducted on the effectiveness of the developed algorithm for the joint reception of signals and the assessment of navigation parameters for communication systems with mobile objects operating in the information field based on a multimark-Polygausal model. By computer modeling, the results of comparing the reliability of the obtained estimates of the quadrature of the signals and standard deviation of coordinate estimates of the developed algorithm and the Monogausal Wiener filtering algorithm were obtained.

Keywords: information field, joint reception, object positioning, correlation reception, poly-Gaussian methods and algorithms.

Статья представлена в редакцию 30 июня 2025 г.