

УВЕЛИЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ КОРРЕКТИРУЕМОЙ ОШИБКИ И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ НЕСУЩЕЙ ГЧМН-МС СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Дереча Е. В. студент ОмГУ,
инженер-программист АО
«ОНИИП»

Введение

В низкоорбитальных системах спутниковой связи частотный сдвиг может достигать 50% и более относительно символьной скорости сигналов. Наибольшее влияние при этом оказывает эффект Доплера при достаточно большой орбитальной скорости космического аппарата.

Дополнительной причиной, вызывающей частотное рассогласование передатчика космического аппарата и приемника абонентского терминала, является нестабильность частот их опорных генераторов.

Цели и задачи

- Применить алгоритмы оценки частоты несущей к сигналам с ГЧМН-МС модуляцией
- Увеличить рабочий диапазон алгоритма Фитца

ГЧМН-МС

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \sum_i a_i h(t - iT) \quad (1)$$

$$a_i = \exp\left(j \frac{\pi}{2} \sum_{l=-\infty}^i \alpha_l\right) \quad (2)$$

$$\alpha_l = \pm 1 \quad (3)$$

$$h(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) & 0 \leq t \leq 2T, \\ 0 & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (4)$$

Искажения в канале

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} e^{j(2\pi\nu t + \theta)} \sum_i a_i h(t - iT - \tau) \quad (5)$$

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (6)$$

ν - частотный сдвиг

$n(t)$ - АБГШ

θ - фазовый сдвиг

τ - временная задержка

Адаптация сигнала

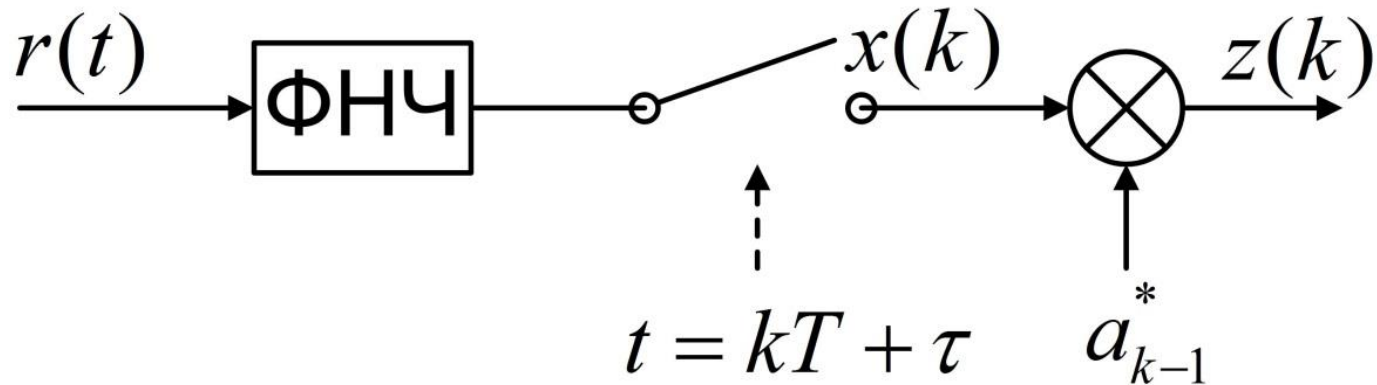


Рис. 1. Обработка принятого сигнала

$$z(k) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} e^{j(2\pi\nu(kT+\tau)+\theta)} + n'(k) \quad (7)$$

Алгоритмы

$$\hat{\nu} = \frac{1}{2\pi T} \sum_{k=0}^{L_0-2} w_k \arg\{z_k^* z_{k+1}\} \quad (8)$$

$$\hat{\nu} = \frac{1}{\pi N(N+1)T} \sum_{m=1}^N \arg\{R(m)\} \quad (9)$$

Луизе и Реджианнини L&R

$$\hat{\nu} = \frac{1}{\pi(N+1)T} \arg\left\{\sum_{m=1}^N R(m)\right\} \quad (10)$$

Менгали и Морелли M&M

$$\hat{\nu} = \frac{1}{2\pi T} \sum_{k=1}^N l_k \arg\{R(k)R^*(k-1)\} \quad (11)$$

Алгоритмы

Оконная функция алгоритма Кея

$$w_k = \frac{3}{2} \frac{L_0}{L_0^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{2k - L_0}{L_0} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Автокорреляционная
функция

$$R(m) = \frac{1}{L_0 - m} \sum_{k=m}^{L_0-1} z(k) z^*(k - m) \quad (13)$$

Оконная функция алгоритма М&М

$$l_k = \frac{3(L_0 - k)(L_0 - k + 1) - N(L_0 - N)}{N(4N^2 - 6NL_0 + 3L_0^2 - 1)} \quad (14)$$

Сравнение ФМ2 и ГЧМН-МС

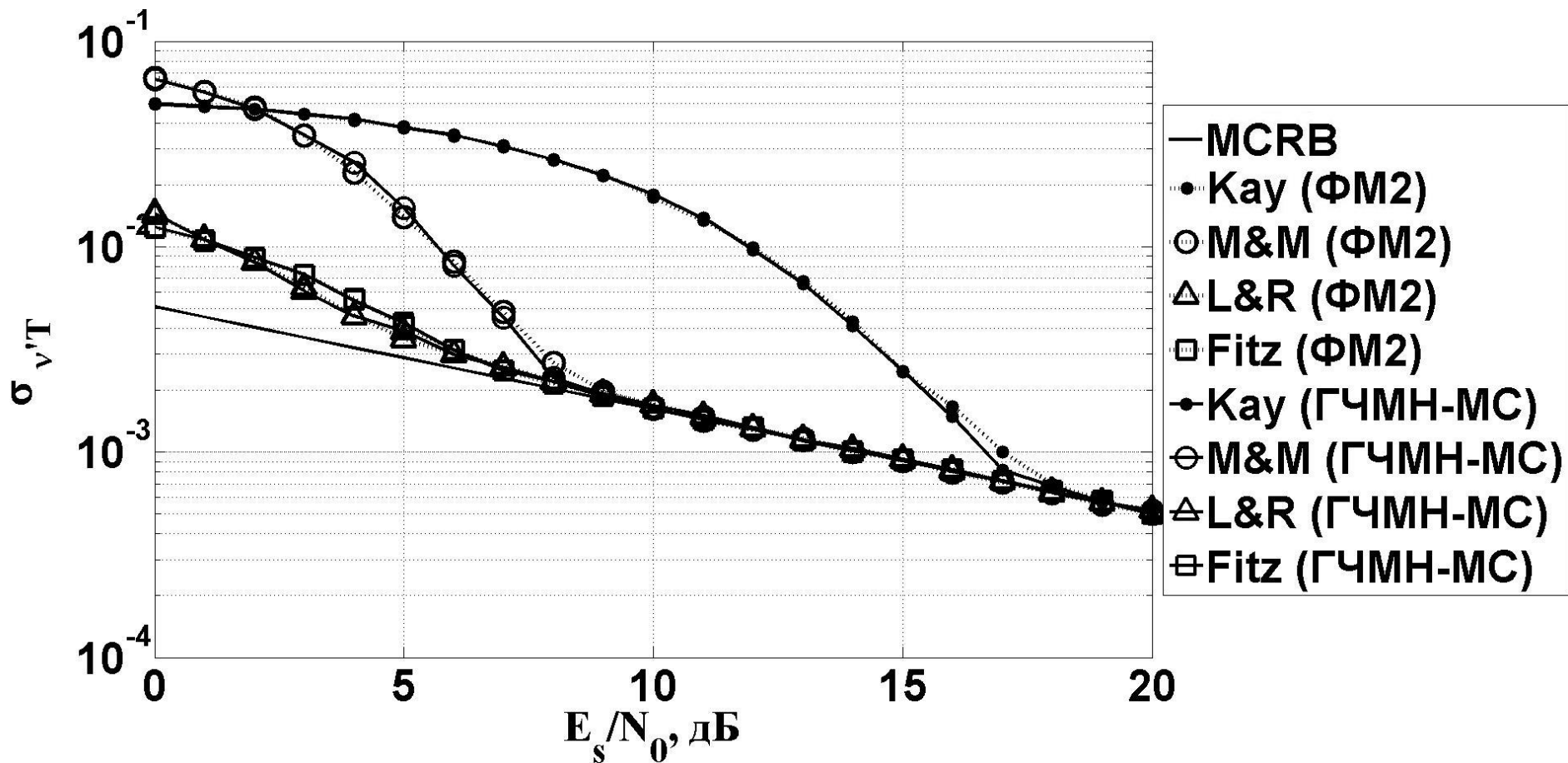


Рис. 2. Зависимость СКО нормированной оценки частотного сдвига от отношения E_s/N_0 , полученной с помощью различных алгоритмов

Рабочие диапазоны

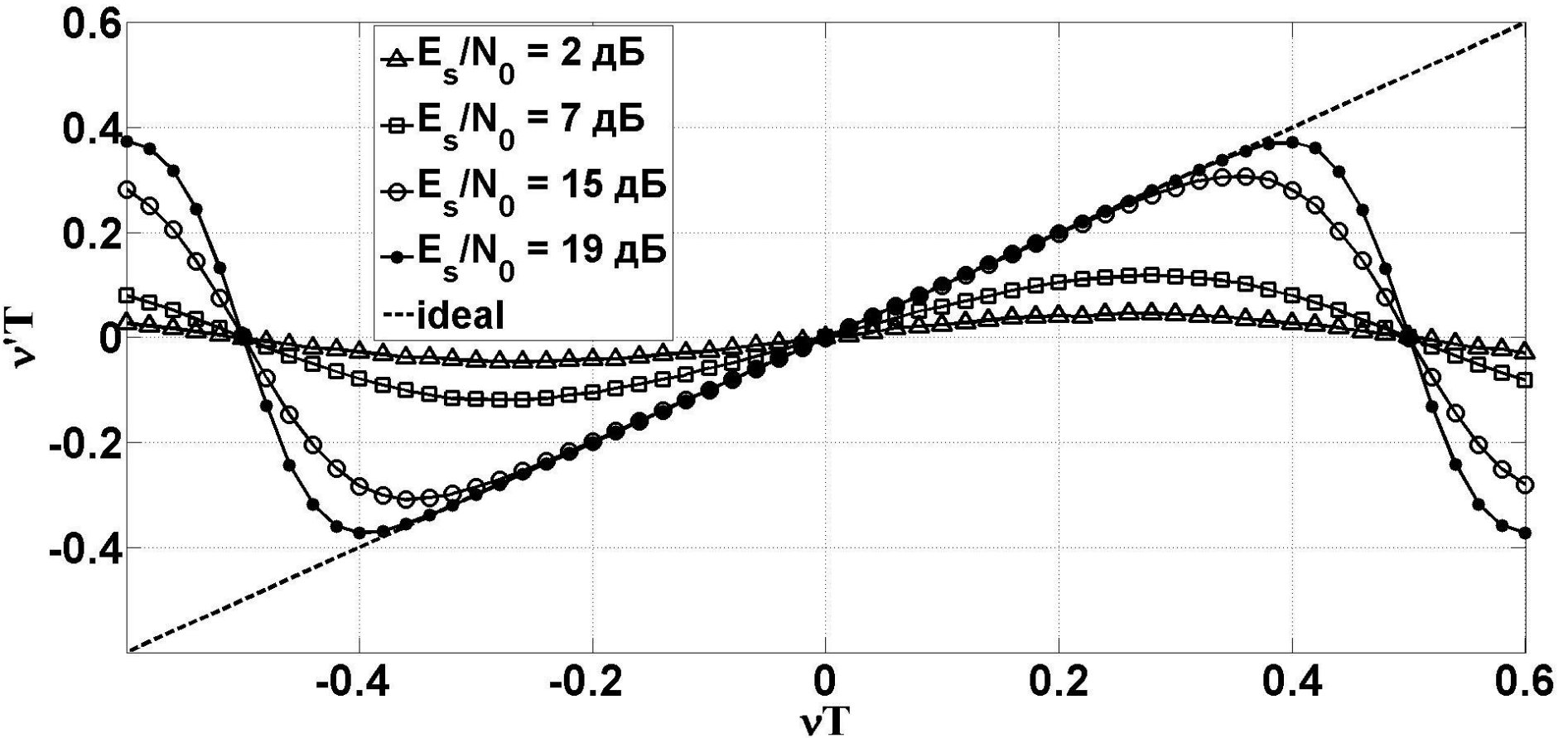


Рис. 3. Зависимость нормированной оценки частотного сдвига от истинного частотного сдвига для алгоритма Кея при различном отношении E_s/N_0

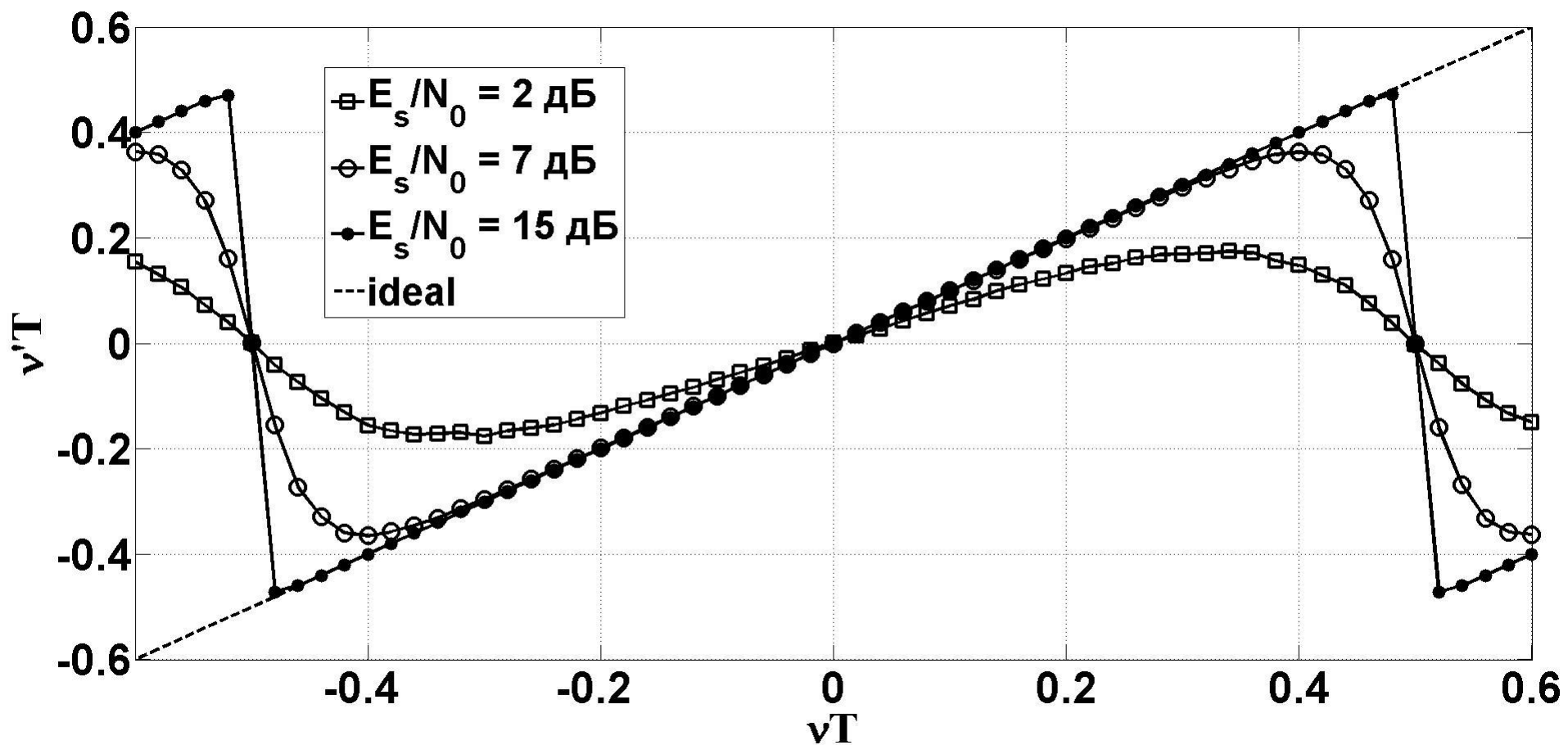


Рис. 4. Зависимость нормированной оценки частотного сдвига от истинного частотного сдвига для алгоритма М&М при различном отношении E_s/N_0

Зависимости от шума

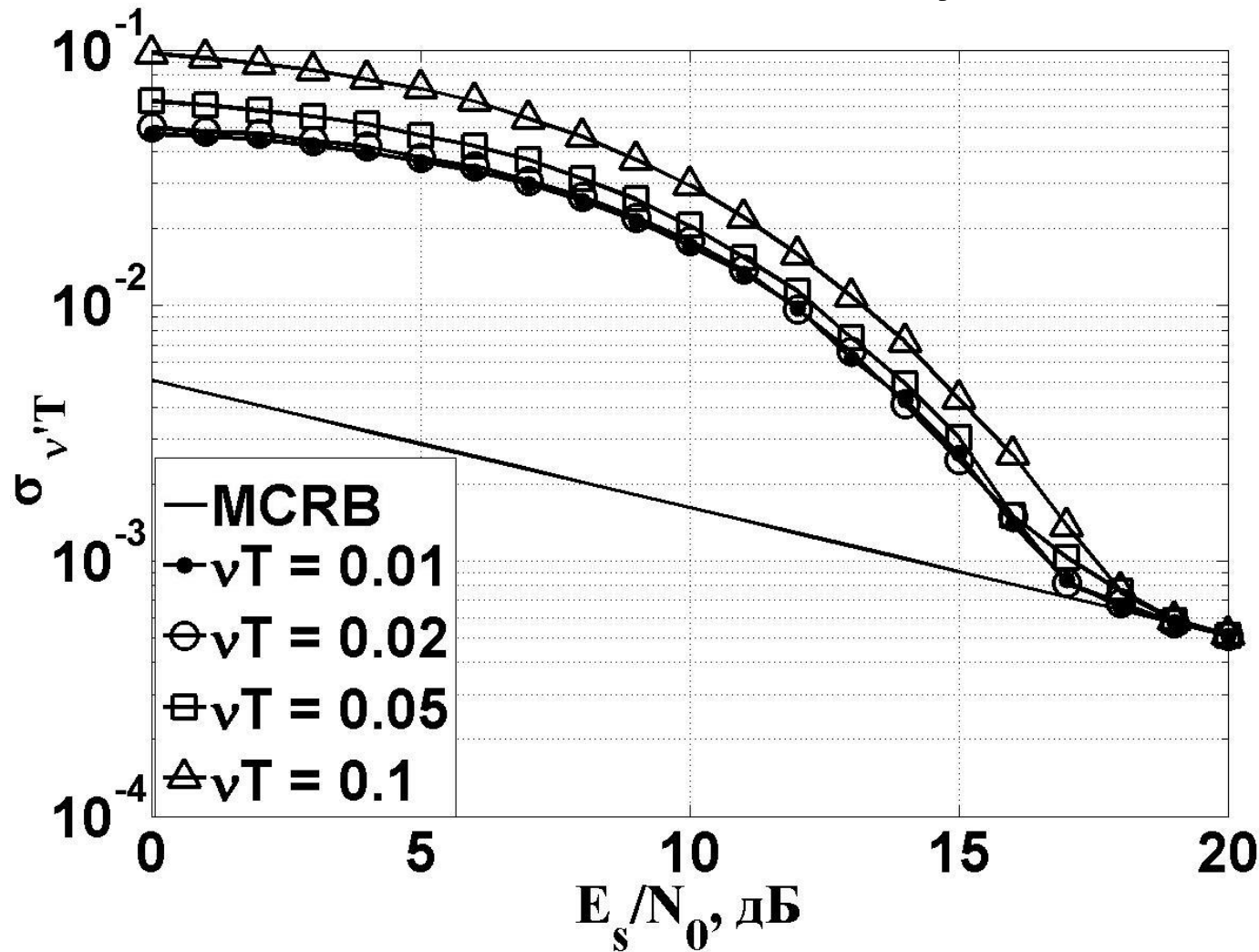


Рис. 5. Зависимость СКО нормированной оценки частотного сдвига от отношения E_s/N_0 для алгоритма Кея при различных частотных сдвигах

Зависимости от шума

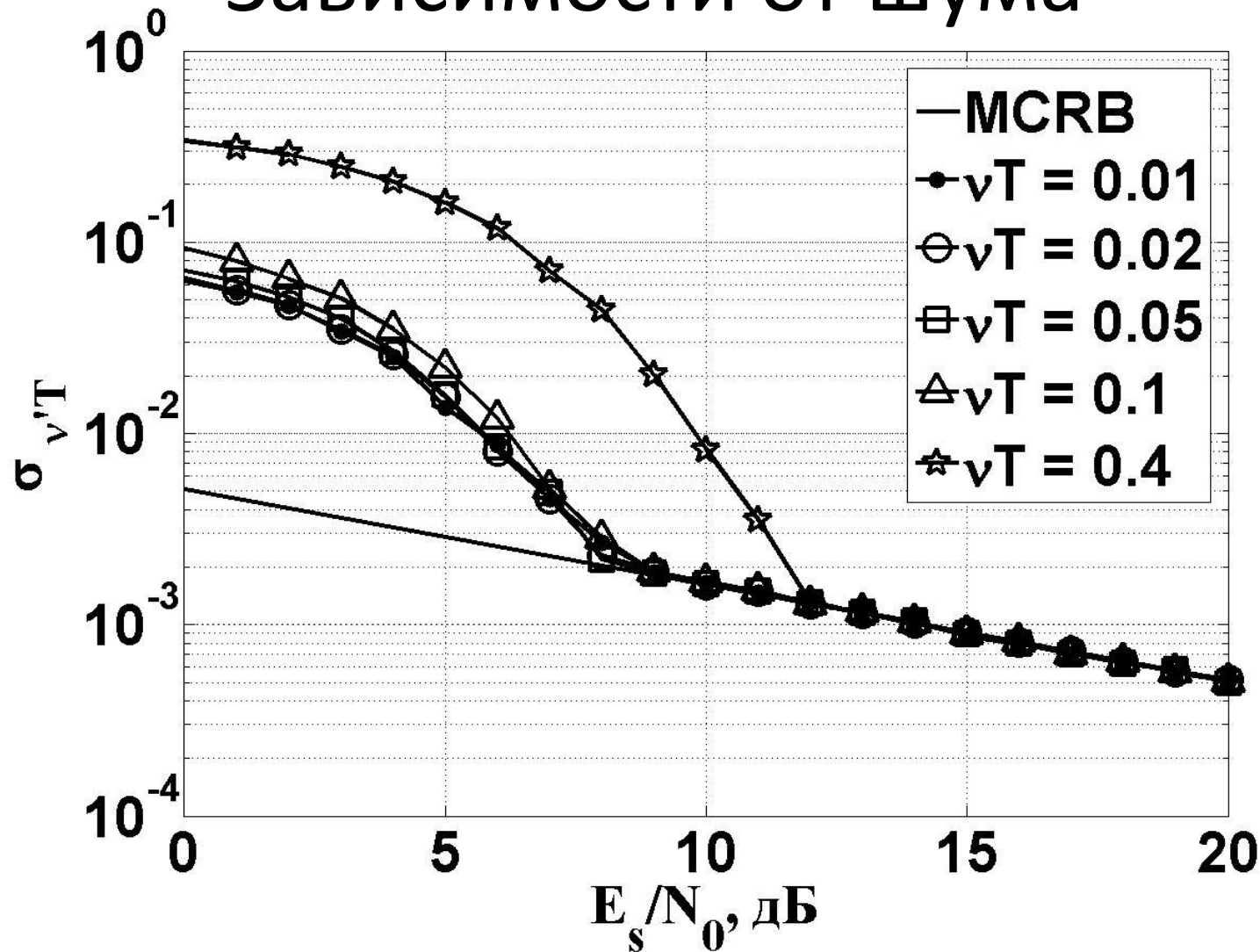


Рис. 6. Зависимость СКО нормированной оценки частотного сдвига от отношения E_s/N_0 для алгоритма М&М при различных частотных сдвигах

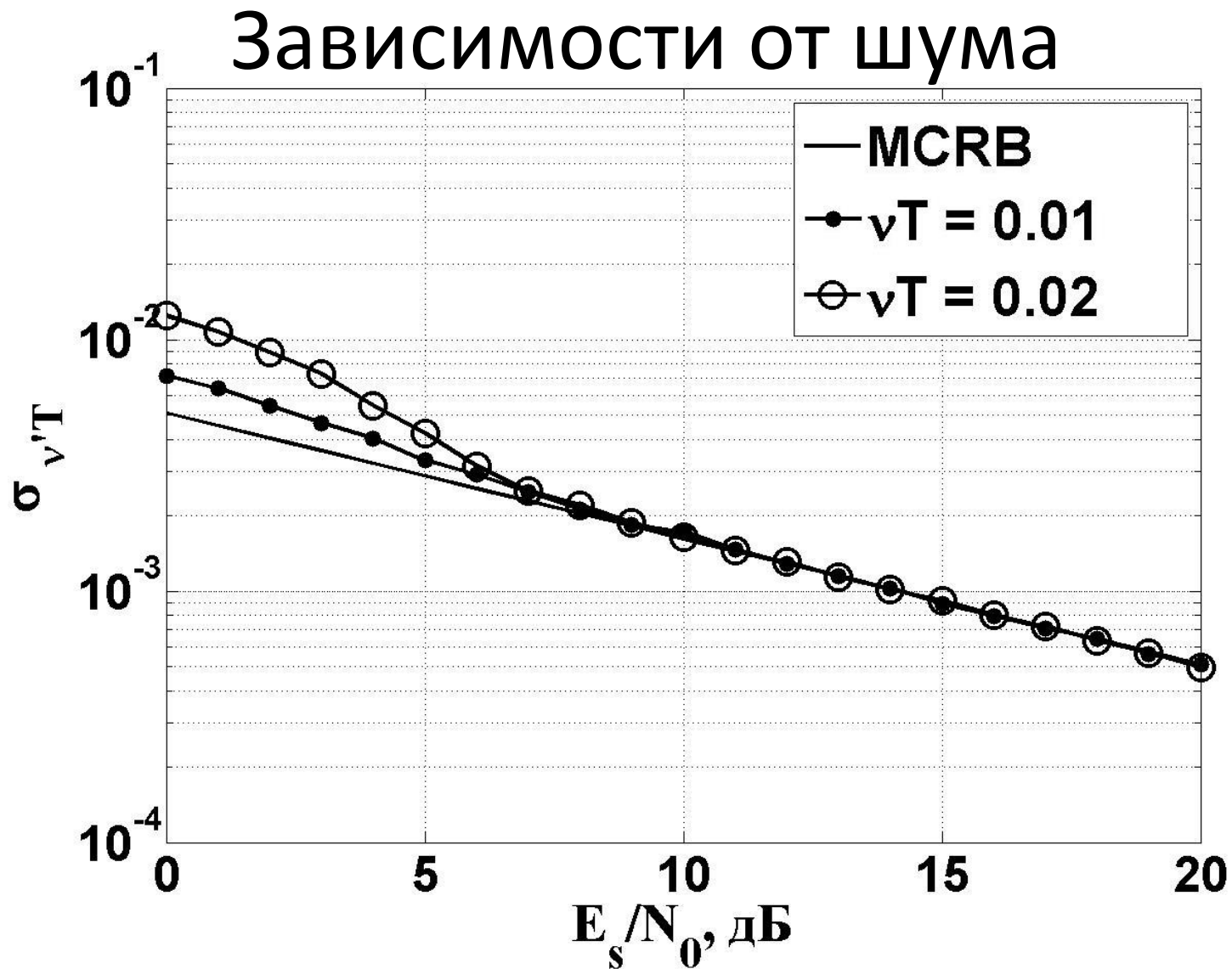


Рис. 7. Зависимость СКО нормированной оценки частотного сдвига от отношения E_s/N_0 для алгоритма Фитца при различных частотных сдвигах

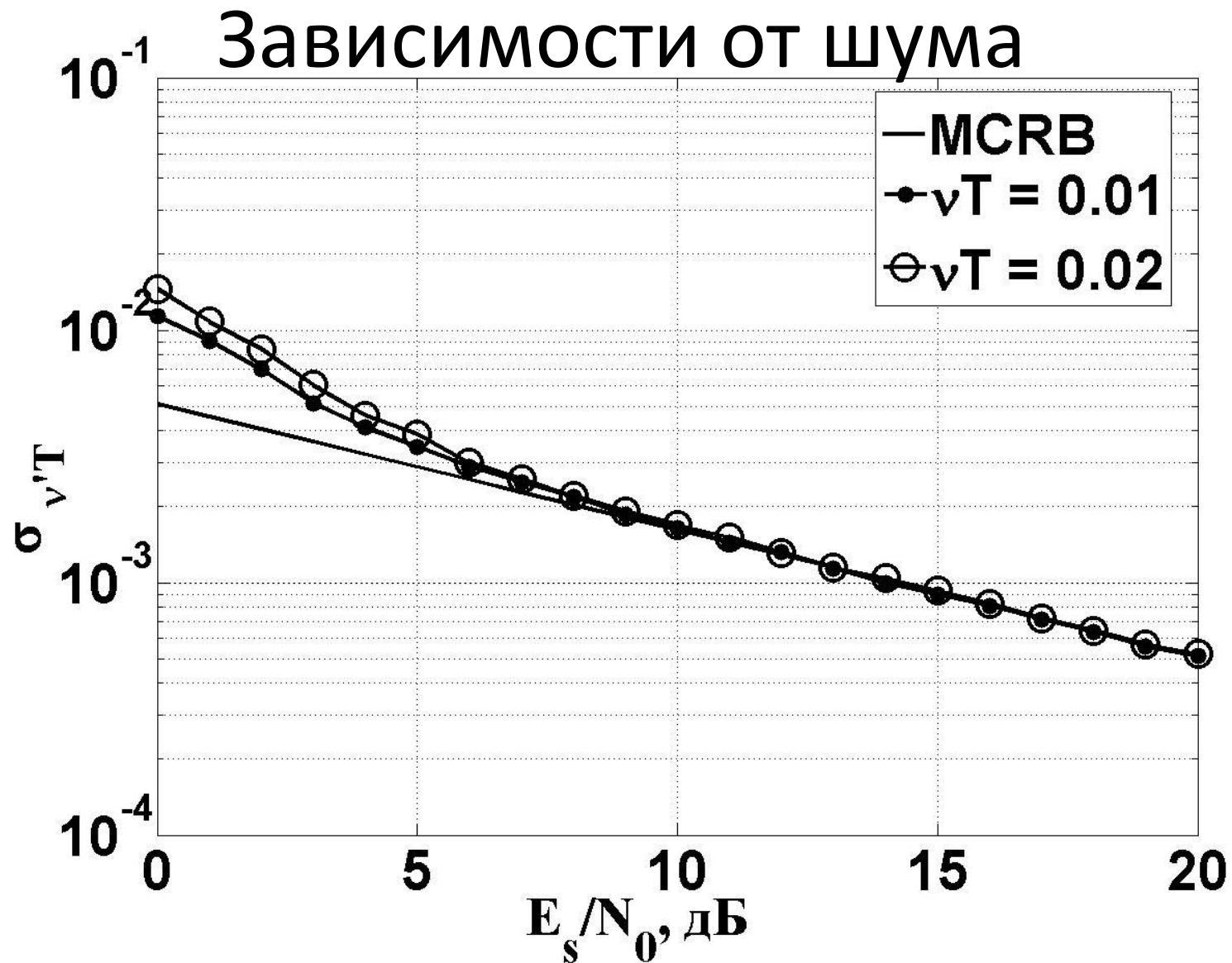


Рис. 8. Зависимость СКО нормированной оценки частотного сдвига от отношения E_s/N_0 для алгоритма L&R при различных частотных сдвигах

Временная область

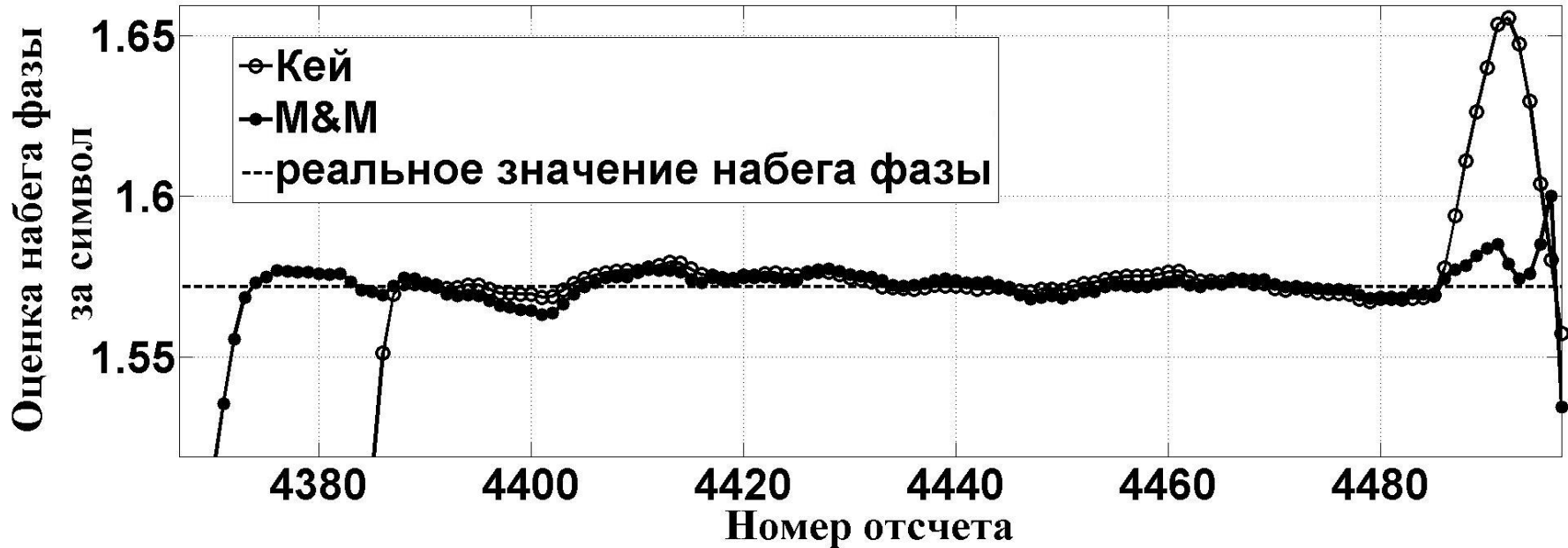


Рис. 9. Зависимость оценки набега фазы за один символ от номера отсчета для алгоритмов Кей и M&M при большом частотном сдвиге

Временная область

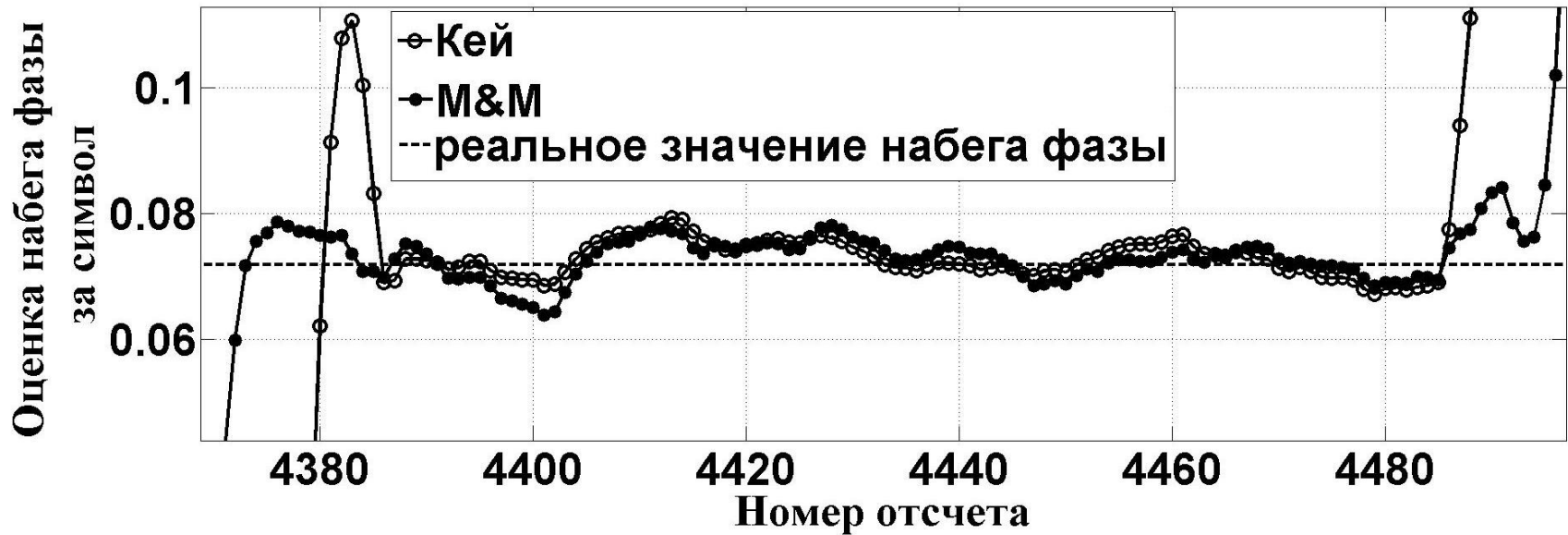


Рис. 9. Зависимость оценки набега фазы за один символ от номера отсчета для алгоритмов Кей и M&M при малом частотном сдвиге

Выводы

При достаточно высоких отношениях $E_s/N_0=17$ дБ и выше рекомендуется использовать алгоритм Кея. Однако, следует учитывать значительное повышение СКО оценки частоты при увеличении реального частотного сдвига, что ограничивает его применимость на значениях сдвига порядка 35-40% относительно символьной скорости.

Для получения более высокой точности в случае сохранения работоспособности при значительных частотных сдвигах (до 50%) целесообразно применять алгоритм Менгали и Морелли, показывающий хорошие результаты при $E_s/N_0>12$ дБ. Однако данный алгоритм требует значительно больших вычислительных затрат за счет использования автокорреляционных функций.

Алгоритмы Фитца и L&R являются наиболее точными из рассмотренных, но способны работать лишь при малом частотном сдвиге (1-2% относительно символьной скорости).

Проблема развёртывания фазы в алгоритме Фитца

Достаточно хорошую точность в оценке частотного сдвига показывает алгоритм Фитца. Но к его недостаткам относится малый рабочий диапазон частотных сдвигов, в которых данный алгоритм способен работать. Причину такого малого допустимого диапазона частотного сдвига можно понять, если рассмотреть поведение аргумента автокорреляционной функции на всей длине наблюдаемой последовательности. Дело в том, что аргумент автокорреляционной функции претерпевает разрывы. Но данную проблему можно решить, применив так называемые алгоритмы развёртывания фазы.

Проблема развёртывания фазы

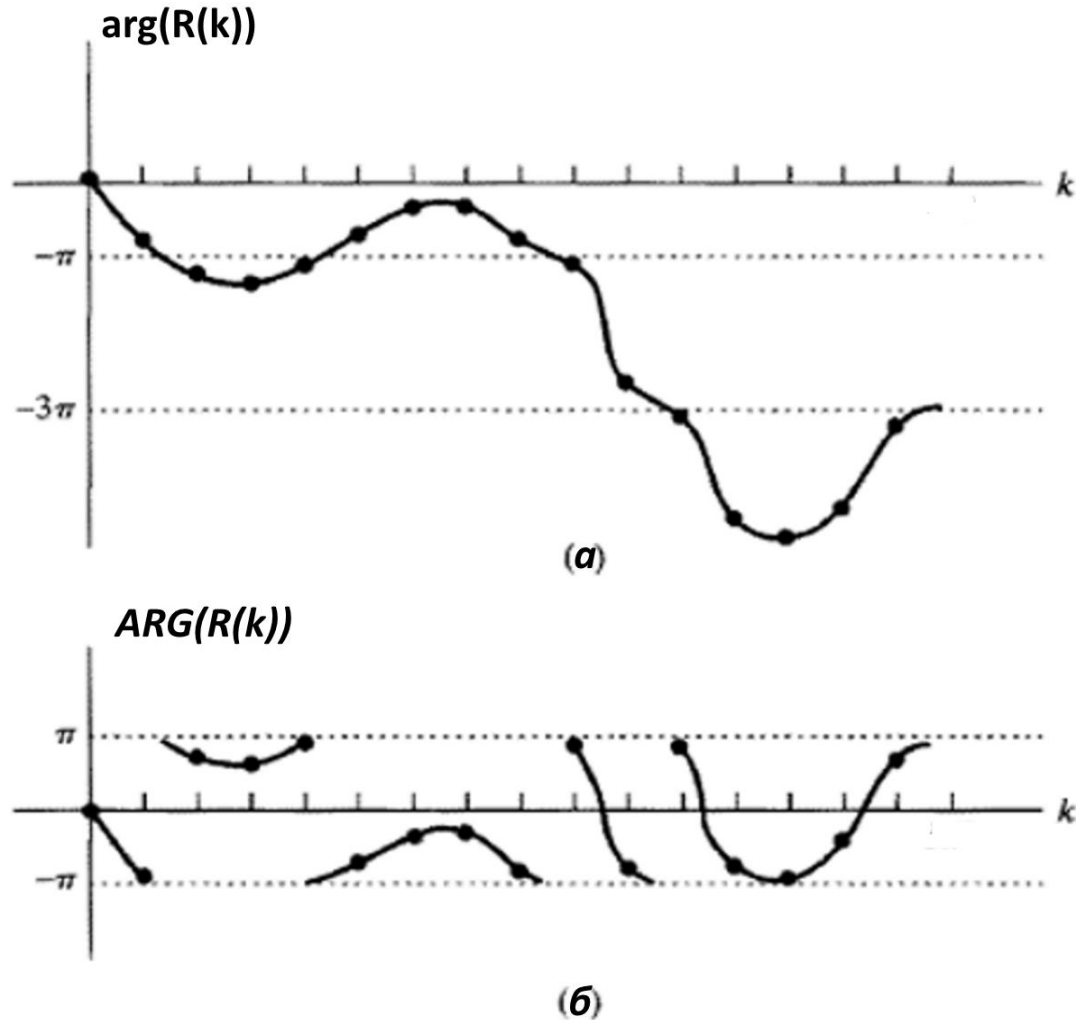


Рис. 10. *a* – развёрнутое значение фазы, *б* – главное значение фазы

Алгоритмы развёртывания фазы

Шафера

Триболе

Медианной фильтрации

Крайника

С использованием фильтра Калмана

Численное моделирование

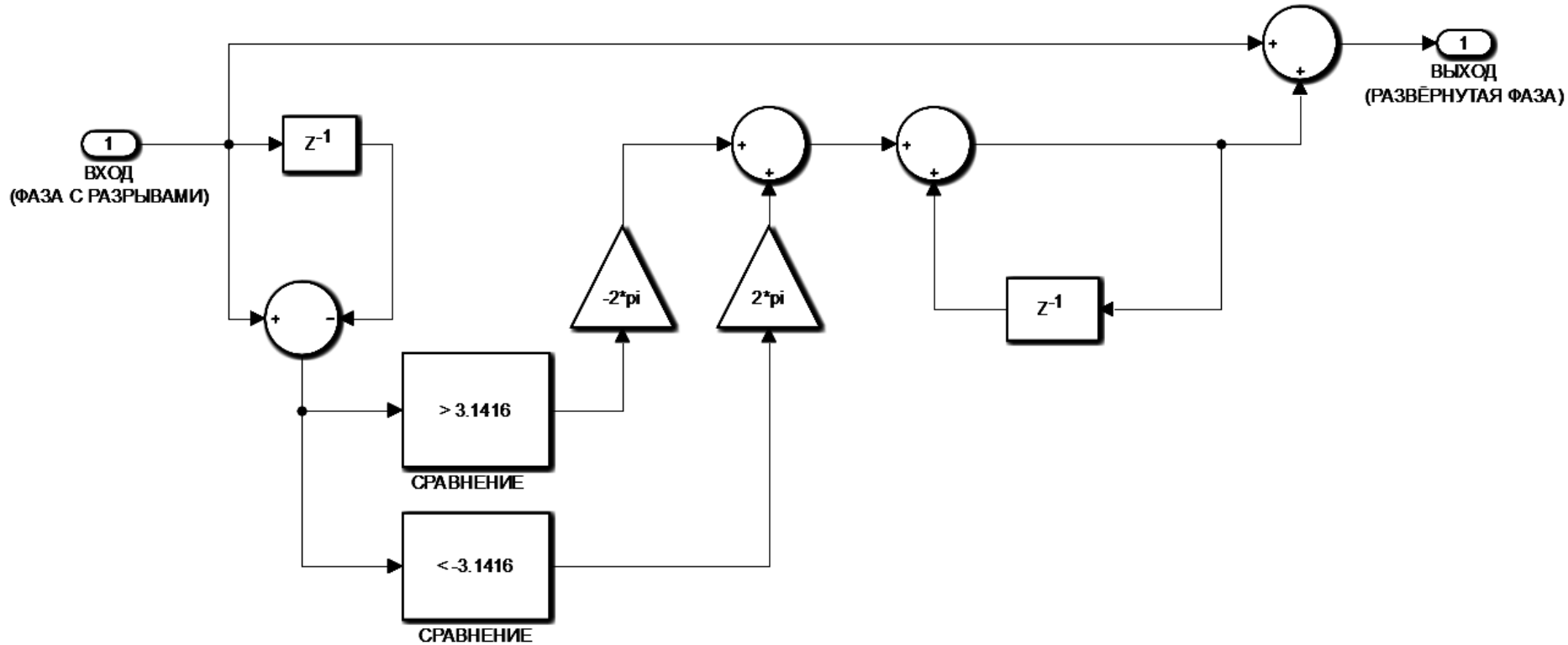


Рис. 11. DSP реализация алгоритма развёртывания фазы Шафера

Сравнение Фитца с развёртыванием с ММ

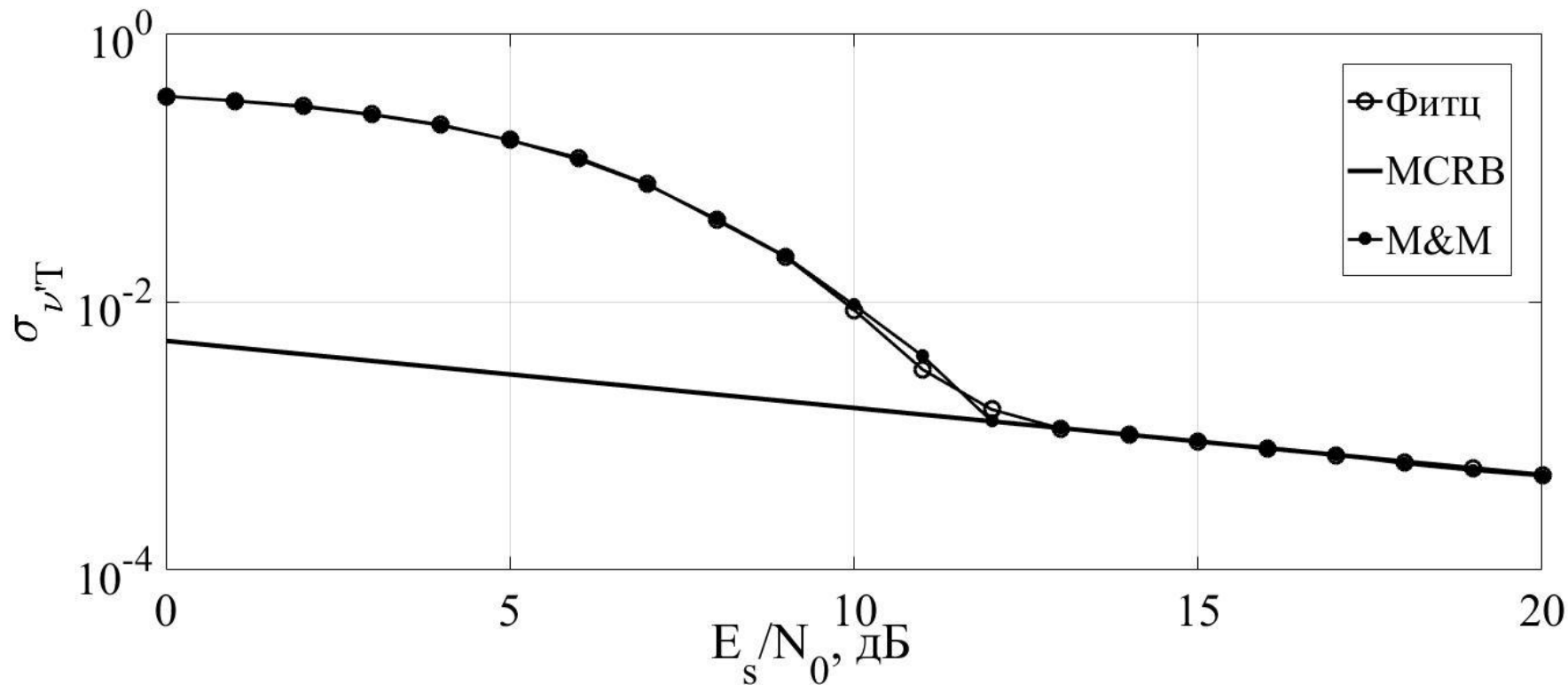


Рис. 12. Зависимость СКО нормированной оценки частотного сдвига от отношения E_s/N_0 для алгоритма Фитца с развёртыванием фазы в сравнении с алгоритмом М&М

Анализ вычислительной сложности

$$O(L_0N - N^2) \quad (15)$$

Моделирование проводилось на ЭВМ с вычислительной мощностью 17,8896 Гфлопс. По результатам компьютерного моделирования получили следующее время на исполнение одной итерации алгоритмов:

Фитц без развёртывания фазы: 1.517e-4 с,

Фитц с развёртыванием фазы по методу Шафера: 1.571e-4 с,

M&M: 1.578e-4 с.

Выводы по развёртыванию

Можно сделать вывод, что применение алгоритма развёртывания фазы Шафера расширяет рабочий диапазон алгоритма Фитца до половины от символьной скорости, а по чувствительности к шумам и времени исполнения приближает его к алгоритму M&M.

Используемая литература

1. *Голдсмит А.* Беспроводные коммуникации. – М.: Техносфера, 2011. – 904 с.
2. *Umberto Mengali, Aldo N. D'Andrea.* Synchronization techniques for digital receivers // Plenum Press, New York, 1997. - 529 p.
3. *Комаров А. А., Рыженко И. Н., Андреев А. С., Леонова А. В.* Увеличение максимальной корректируемой ошибки при реализации алгоритма Фитца.// Решетневские чтения, 2015. –с. 234- 236.
4. *Скиена С.* Алгоритмы. Руководство по разработке. – 2-е изд.: Пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург. 2011. – 720с.: ил.