

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.24>

УДК: 621.39

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В ПРИЕМНИКЕ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ НЕГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А.М. Бибиков, И.Е. Леонов

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

Статья поступила в редакцию 27 октября 2023 г.

Аннотация. Работа посвящена сравнительному исследованию различных алгоритмов компенсации частотного сдвига в одночастотном радиоканале в условиях изменяющего доплеровского сдвига по частоте. Исследованы результирующие характеристики алгоритмов компенсации частотного смещения на основе метода Фитца и на основе метода наименьших квадратов. Методом численного эксперимента получены точностные характеристики работы исследуемых алгоритмов в ситуациях постоянного и меняющегося частотных сдвигов. Были выявлены лучшие точностные характеристики алгоритма на основании метода Фитца по сравнению с алгоритмом, построенном на основе метода наименьших квадратов. При этом алгоритм на основании метода наименьших квадратов показал удовлетворительные точностные характеристики работы при изменяющемся частотном сдвиге, в условиях которого алгоритм на основании метода Фитца оказывается неработоспособным.

Ключевые слова: спутниковая связь; физический уровень; синхронизация; одночастотный канал; помехоустойчивость.

Финансирование: Работа выполнена в Московском физико-техническом институте при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 075-11-2021-047.

Автор для переписки: Бибиков Александр Михайлович, kafedrax@yandex.ru

Введение

Алгоритмы частотной синхронизации на основе априорной (пилотной) информации обычно используются в системах цифровой связи. В данной статье рассматривается синхронизация на приеме в условиях обратного канала с временным разделением (TDMA) сети спутниковой связи. Данные условия характеризуются невозможностью применения следящих алгоритмов восстановления несущего колебания, так как TDMA-канал в части поведения абонентов в эфире характеризуется непостоянным присутствием абонента в радиозфире. Выход абонента в эфир может осуществляться с довольно большими промежутками времени, за которые может произойти существенная с точки зрения следящих алгоритмов, реализованных по типу фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), рассинхронизация приемного и передающего гетеродинов.

Таким образом, встает необходимость пакетной обработки принимаемых блоков выборок IQ-сигнала с решением задачи синхронизации на основании данных одного пакета. Рассматривается задача предварительной частотной синхронизации на основе априорной информации (блоков пилотных символов заданной длины) с точки зрения их применимости в условиях изменяющегося частотного сдвига, характерного для негеостационарной орбиты космического аппарата.

Оценка частотного сдвига методами Фитца и наименьших квадратов

Идея оценки частотного смещения, предложенная Фитцем, заключается в том, что автокорреляционная функция (АКФ) \dot{R}_k блока пилотных символов

$\{\dot{y}_n\}$, представляющего отсчеты IQ-сигнала, содержит в себе нормированный частотный сдвиг F_0 , который можно оценить по следующей формуле [1,2]:

$$\hat{F}_0 = \frac{1}{\pi N(N+1)} \sum_{k=1}^N \arg\{\dot{R}_k\},$$

где $\dot{R}_k = \sum_{n=k}^N \dot{y}_n \dot{y}_{n-k}^*$, N – длина блока пилотных символов.

Если совместно обрабатываются пилот-сигналы M блоков, то для оценки \hat{F}_0 можно использовать суммарную АКФ всех блоков:

$$\dot{R}_{k_\Sigma} = \sum_{m=1}^M \dot{R}_{k_m}.$$

Для корректной работы метода аргумент АКФ должен лежать в диапазоне $-\pi \dots \pi$. Следовательно, верхний предел оценки частотного сдвига не должен превосходит $1/2N$ от символьной скорости. Однако это ограничение легко устранить, если воспользоваться свойством периодичности аргумента \dot{R}_k и преобразовать массив отсчетов фазы φ_k по следующему правилу [3,4]:

$$\begin{aligned} \varphi'_k &= \varphi_k + \delta_k, \\ \delta_1 &= 0, \\ \begin{cases} \delta_k = \delta_{k-1} - 2\pi \operatorname{sgn}(\varphi_k - \varphi_{k-1}), & |\varphi_k - \varphi_{k-1}| > \pi; \\ \delta_k = \delta_{k-1}, & |\varphi_k - \varphi_{k-1}| < \pi. \end{cases} \end{aligned}$$

На рис. 1 приведены результаты работы алгоритма Фитца. Моделирование проводилось при постоянном частотном сдвиге $F_0 = 5\%$ от символьной скорости. В качестве переменных параметров использованы количество отсчетов пилот-сигнала в выборке $N = 20 \dots 100$ и отношение сигнал/шум на символ $E_{sym}/N_0 = 3 \dots 15$ дБ. Для каждой пары значений $(N; E_{sym}/N_0)$ проводилось $T = 10^4$ экспериментов и оценивалось среднеквадратичное отклонение (СКО) $\sigma_e(N; E_{sym}/N_0)$ ошибки определения частотного сдвига $e_t = \hat{F}_{0_t} - F_0$.

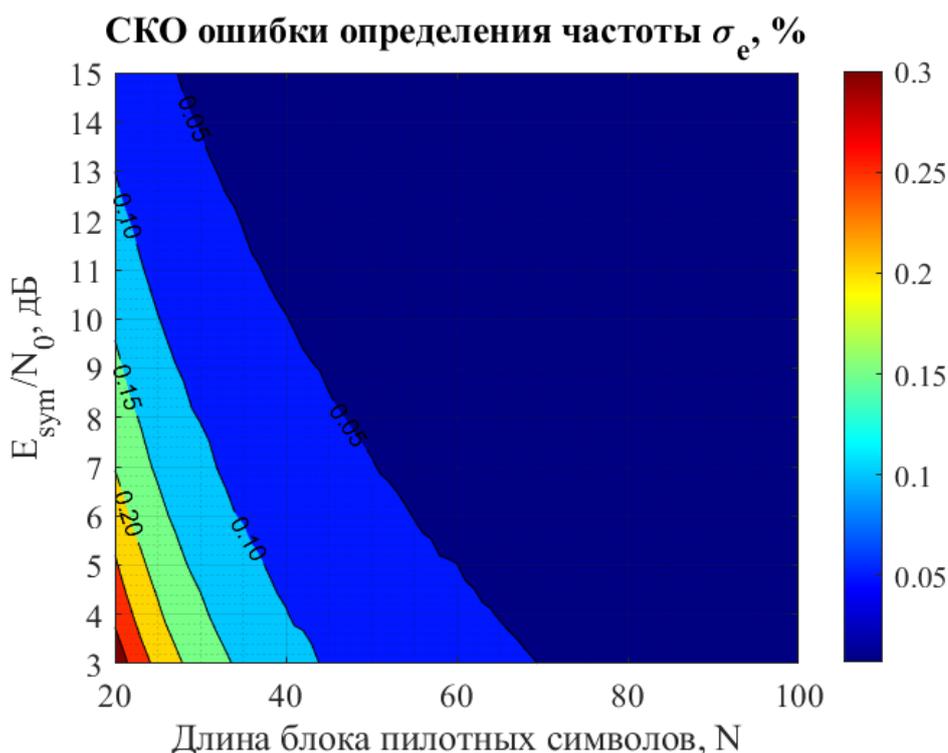


Рис. 1. Зависимость СКО ошибки определения частотного смещения от длины пилотного блока и отношения сигнал/шум на символ для метода Фитца

Задача оценки постоянного частотного смещения $F_0 = const$ включает в себя решение двух проблем:

- 1) линеаризации аргумента выборки $\{\dot{y}_n\}$;
- 2) оценки коэффициента наклона получившегося набора зашумленных отсчетов.

Если преобразовать фазу φ_k блока пилотных символов $\{\dot{y}_n\}$ подобно тому, как это предложено делать в методе Фитца, и применить к полученному набору отсчетов φ'_k метод наименьших квадратов (МНК) для аппроксимации линейного закона нарастания фазы $y = ax + b$, то частотное смещение в процентах от символьной скорости можно оценить следующим образом:

$$\hat{F}_0 = 100 \frac{a}{2\pi}.$$

На рис. 2 приведены результаты применения МНК для оценки частотного смещения, равного $F_0 = 5\%$ от символьной скорости. Моделирование

проводилось для тех же диапазонов изменения величин N , E_{sym}/N_0 и количества экспериментов T .

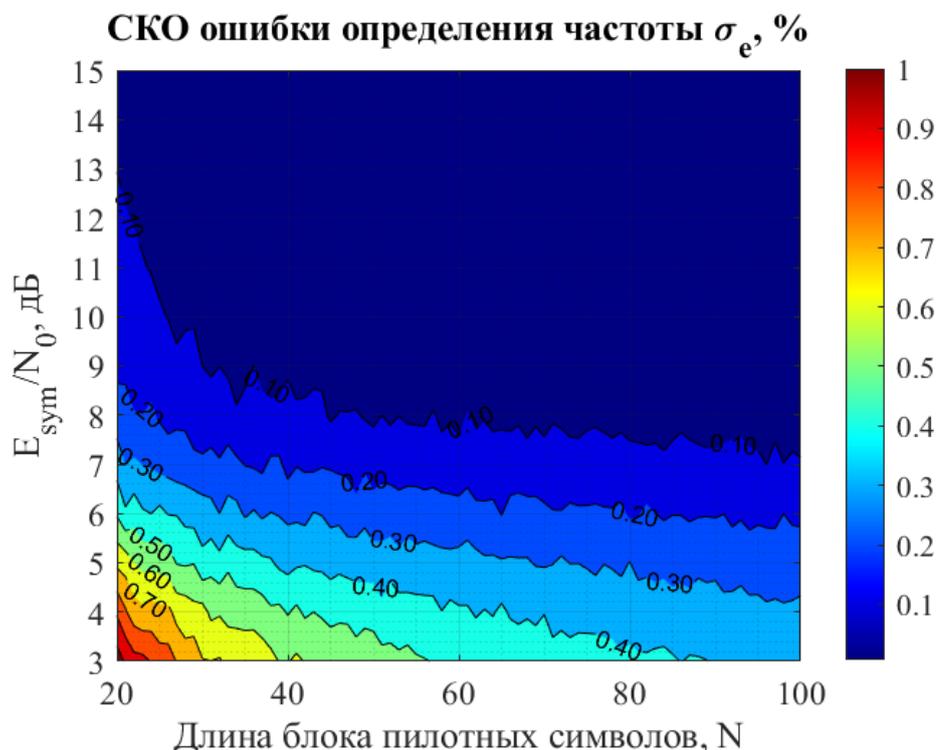


Рис. 2. Зависимость СКО ошибки определения частотного смещения от длины пилотного блока и отношения сигнал/шум на символ для МНК

Функция преобразования фазы отсчетов $\{\dot{y}_n\}$ основана на определении индексов тех отсчетов, где происходит изменение знака. Массив переходов через 0 – $idxZero$, массив переходов через $\pm\pi$ – $idxPi$. Полученные массивы корректируется в два этапа. На первом этапе в каждом массиве определяются расстояния между индексами. Если оно меньше 10, то меньший индекс остается, а больший исключается. На втором этапе из двух составляется один массив $idxAll$. В таком массиве индексы переходов чередуются. Если в массиве $idxAll$ расстояние между индексами меньше 5, то исключаемый индекс должен быть таким, чтобы не нарушить общее чередование переходов. Затем, используя метод Фитца, осуществляется преобразованием фаз отсчетов $\{\dot{y}_n\}$.

С целью исследования точности предложенной процедуры линейаризации фазы рассчитывалась вероятность ошибки при оценивании частотного смещения $P_{err}(N; E_{sym}/N_0)$, которая определялась в процентах от общего числа

экспериментов T . Оценка частотного смещения t -го эксперимента предполагалась ошибочной, если $|\bar{e} - e_t| > 3\sigma_e$. Результаты приведены на рис. 3.

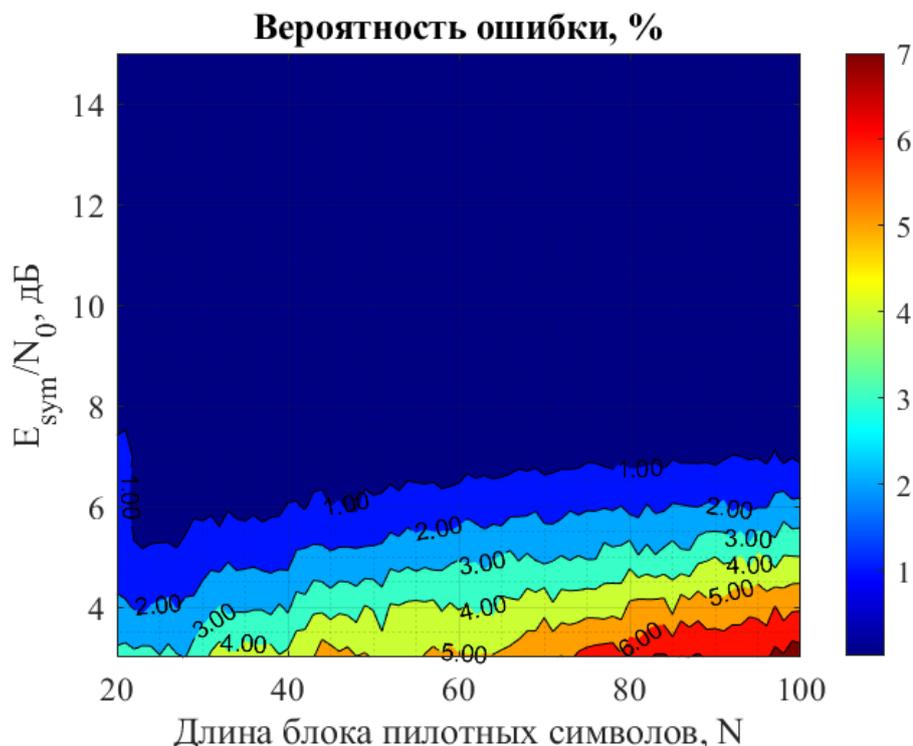


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибочной оценки частотного смещения от длины пилотного блока и отношения сигнал/шум на символ для МНК

Если смещение частоты $F(n)$ зависит от номера отсчета (времени), то применение метода Фитца становится невозможным. Напротив, при использовании МНК появляется возможность аппроксимировать законы различной степени сложности. На рис. 4–5 представлен результат для оценки частотного смещения $F(n) = 3 + 0.05n$, что соответствует постоянному смещению частоты $F_0 = 3\%$ от символьной скорости и доплеровскому смещению частоты $F_D = 0.05\%$ от символьной скорости. Определялись СКО и вероятность ошибки при определении коэффициента a квадратичного закона аппроксимации фазы $y = ax^2 + bx + c$, соответственно. Параметры моделирования N , E_{sym}/N_0 и T те же, что и в предыдущих пунктах.

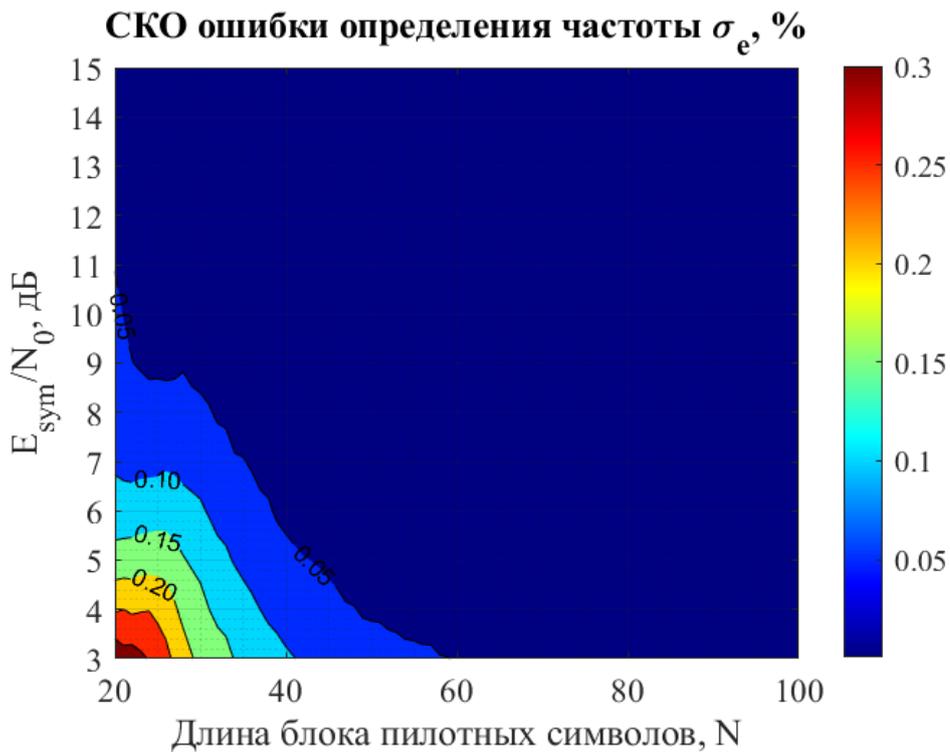


Рис. 4. Зависимость СКО ошибки определения доплеровского смещения частоты от длины пилотного блока и отношения сигнал/шум на символ для МНК

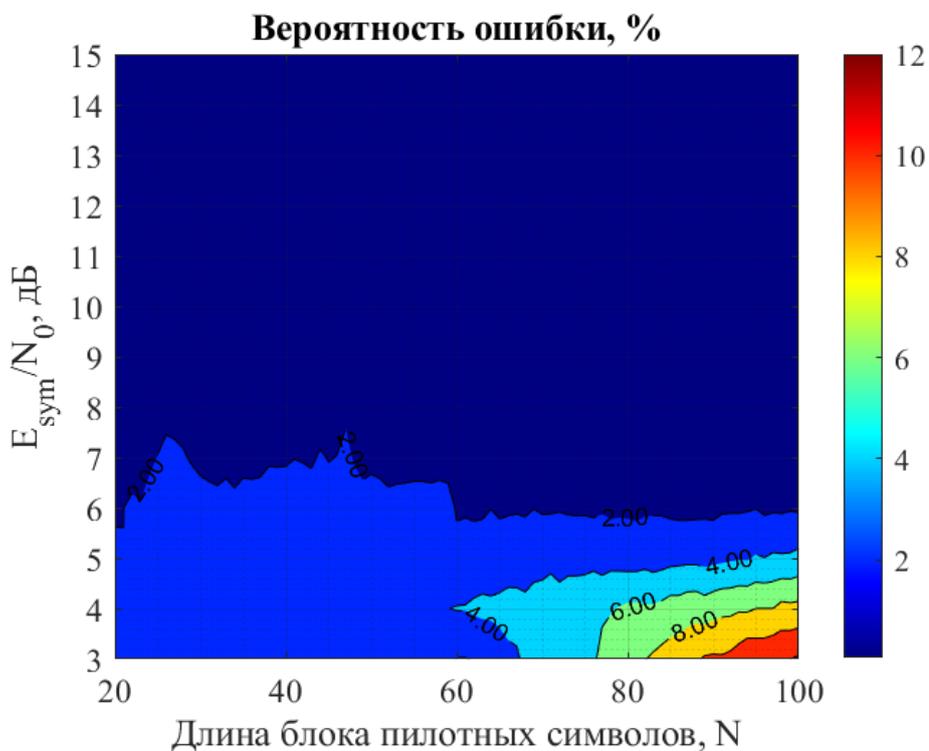


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибочной оценки доплеровского смещения частоты от длины пилотного блока и отношения сигнал/шум на символ для МНК

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Точность алгоритмов предварительной оценки частотного смещения на основе МНК в условиях неизменяющегося частотного сдвига хуже, чем таковая при использовании алгоритма Фитца.
- Алгоритмы предварительной оценки частотного смещения на основе МНК в условиях изменяющегося частотного сдвига показывают удовлетворительный начальный результат, который может быть улучшен как путем дополнительного исследования в части эвристических алгоритмов восстановления фазы пилотных сигналов с учетом модульной арифметики и в условиях зашумленности канала, так и путем дополнительного исследования в части комбинации алгоритмов на основе МНК и алгоритма Фитца.

Финансирование: Работа выполнена в Московском физико-техническом институте при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 075-11-2021-047.

Литература

1. Qasim C. Wireless Communication from the Ground Up. An SDR Perspective. Melbourne, Australia. 2018, 815 p.
2. Fitz M.P. Planar filtered techniques for burst mode carrier synchronization. IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM '91: Countdown to the New Millennium. Conference Record. Phoenix, AZ, USA. 1991.
<https://doi.org/10.1109/GLOCOM.1991.188412>
3. Увеличение максимальной корректируемой ошибки при реализации алгоритма Фитца / А. А. Комаров, И. Н. Рыженко, А. С. Андреев, А. В. Леонова. // XIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 55-летию Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева, КРР, 10-14 ноя., 2015 г. / СибГУ, КРР, 2015, С. 234-236.

4. Антюфриева Л. А., Янситов К. К., Дворкович А. В. Алгоритмы синхронизации физического уровня для сигнально-кодовой конструкции, повышающей помехоустойчивость режима VL-SNR стандарта DVB-S2X // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. № 8.

<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.9>

Для цитирования:

Бибиков А.М., Леонов И.Е. Исследование алгоритмов предварительной частотной синхронизации в приемнике спутниковой связи в условиях негеостационарной орбиты космического аппарата. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.24>