

УДК 621.39

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ  
ГЕНЕРАТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В  
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Д. А. Алексеев, Н. П. Евсеев,  
Е. В. Палеха, О. А. Сафарьян*

Донской государственной технической  
университет, Ростов-на-Дону, Российская  
Федерация

[arvie@inbox.ru](mailto:arvie@inbox.ru),  
[Nikib251@gmail.com](mailto:Nikib251@gmail.com),  
[paleha1994@mail.ru](mailto:paleha1994@mail.ru),  
[safari\\_2006@mail.ru](mailto:safari_2006@mail.ru)

Описывается решение актуальной проблемы реализации сотовых сетей и радиотехнических систем передачи информации, связанной с влиянием стабильности частоты генераторов на их характеристики. Предложено решение, основанное на повышении точности оценивания частоты генераторов, которое позволит отказаться от использования высокочастотных высокостабильных генераторов, требующих значительных финансовых затрат. Повышение стабильности частоты при использовании большого количества генераторов позволит повысить качество связи при минимальных финансовых затратах.

**Ключевые слова:** генераторы, стабилизация частоты, отклонение частоты, радиосвязь, сигнал.

**Введение.** Автоматизированные системы управления предназначены для сбора, обработки и передачи информации, проведения оперативных расчетов и многого другого. Их внедрение в практику управления позволяет повысить его оперативность, качество, устойчивость и безопасность.

Важное место в автоматизированных системах связи отводится передаче данных. Системы должны осуществлять автоматический обмен информацией и обеспечивать функционирование системы управления. Важной особенностью систем передачи данных являются высокие требования к достоверности передачи, что, как правило, обусловлено важностью передаваемой информации и трудностью логического контроля в процессе передачи и приема.

UDC 621.39

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF  
FREQUENCY STABILITY OF  
GENERATORS ON THE  
CHARACTERISTICS OF INFORMATION  
TRANSFER IN RADIO ENGINEERING  
SYSTEMS**

*D. A. Alekseev, N. P. Evseev,  
E. V. Paleha, O. A. Safaryan*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

[arvie@inbox.ru](mailto:arvie@inbox.ru),  
[Nikib251@gmail.com](mailto:Nikib251@gmail.com),  
[paleha1994@mail.ru](mailto:paleha1994@mail.ru),  
[safari\\_2006@mail.ru](mailto:safari_2006@mail.ru)

The article describes the solution of the current problem of cellular networks and radio communication systems related to the effect of frequency stability of generators on their characteristics. It proposes a solution which is based on increasing the accuracy of estimation of generators' frequency, which makes it possible to get rid of high-frequency, very stable generators that require large financial costs. Increasing the stability of frequency when using a large number of generators can improve the quality of communication with minimal financial costs.

**Key words:** generators, frequency stabilization, frequency deviation, radio communication, signal.

В данном исследовании рассматривается контроль стабильности сигнала в канале связи. Стабильность сигнала очень часто влияет на достоверность принятой и отправленной информации, поэтому контроль сигнала оказывает влияние на качественные показатели инфокоммуникационных и радиотехнических систем и устройств. Таким образом, контроль сигнала предшествует логическому контролю, что непосредственно влияет на достоверность информации.

**Основная часть.** Радиорелейная связь — вид наземной радиосвязи, при которой информация распространяется по линии в виде цепочки ретранслирующих радиостанций. Прием и передача сигналов происходит в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн. Антенны станций обычно устанавливают на сооружениях высотой 100 м, а антенны соседних станций должны находиться в прямой видимости в пределах 50 км. Таким образом, соседние радиостанции находятся в прямой видимости друг от друга, обеспечивая этим устойчивую работу.

Примером использования радиорелейных линий связи является организация телевизионного канала связи, передача телеграфных и телефонных сигналов в местах со слабо развитой инфраструктурой. В настоящее время радиорелейная связь применяется при организации каналов связи между различными элементами сотовой сети. Современные радиорелейные линии связи способны обеспечить передачу больших объёмов информации от базовых станций 2G, 3G и 4G к основным элементам опорной сети сотовой связи. В более сложных случаях строятся ответвления от основной линии или создаются сети распределения информации между регионами, населенными пунктами или непосредственно между потребителями [1–3].

**Постановка задачи.** Сотовая система представляет собой сеть относительно маломощных радиостанций, осуществляющих радиообмен с помощью мобильных радиотелефонов. Для обеспечения хорошего покрытия большой зоны необходимо устанавливать принимающую и передающую антенны на максимально высоком месте, например, на самом высоком здании населенного пункта или на вершине горы. Вся зона покрытия разбивается на равновеликие ячейки в виде шестигранных сот, что и определяет название. В центре каждой соты размещается базовая станция с антенной. В соседних ячейках сотовой связи используются разные частоты радиоволн, на которых ведутся переговоры, а через одну ячейку частоты могут повторяться. Таким образом во всей зоне покрытия используется всего лишь три частоты.

Спутниковая связь — один из самых современных видов связи. Дальность действия радиосвязи непосредственно зависит от высоты антенны, из чего следует необходимость установки антенны на максимально возможной высоте. В этом случае наилучшим решением является использование спутников. Кратко изложим принцип работы спутниковой связи. Например, имеются антенны, расположенные на спутнике, и имеются специальные радиостанции, расположенные на Земле. Для передачи данных один абонент отправляет сигнал на станцию, которая передает этот сигнал на спутник, который в свою очередь передает сигнал на наземную станцию, которая обслуживает зону другого абонента. Земная поверхность препятствует прохождению радиосигнала из-за своей кривизны, именно поэтому нельзя передать сообщение непосредственно с одной земной станции на другую. Но спутниковая связь позволяет расширить зону действия радиосигнала практически на всю поверхность Земли.

Все вышеописанные виды связи используют генераторы для передачи и приема сигналов, с помощью которых передаются данные. При передаче сигналов могут возникать помехи, которые влияют на достоверность информации. Информация может искажаться настолько существенно,

что даже при логическом контроле не всегда исправляются ошибки при декодировании. Причиной таких помех чаще всего бывают внешние факторы, например, погодные условия или магнитные бури. При обнаружении недостоверной информации приходится повторять передачу данных, пока информация не будет достоверной. Одним из основных факторов, влияющих на достоверность передачи данных, является стабильность частоты сигналов.

**Теоретическая часть.** Повышение стабильности частоты колебаний в радиотехнических устройствах возможно на основе использования двух способов. Первым является использование уже существующих методов повышения стабильности частот генератора. Эти методы, как правило, используют высокочастотные и высокостабильные генераторы [4]. С одной стороны, эти методы позволяют добиться высокой стабильности частоты. Однако применение таких методов связано, как правило, с существенными техническими сложностями и экономическими затратами. Наряду с вышесказанным следует учитывать, что в современных инфокоммуникационных системах используются генераторы с различными параметрами, что усложняет задачу их одновременной стабилизации [4].

В то же время способы и алгоритмы второй группы, построенные на использовании свойств синергичности и эмерджентности системы одновременно и независимо работающих генераторов, позволяют повысить точность оценивания частоты генераторов путем обработки одновременно измеренных значений фаз генераторов.

С учетом проведенного анализа сформулирована цель данной работы, состоящая в повышении стабильности частоты генераторов без использования высокочастотных высокостабильных опорных генераторов.

Рассмотрим влияние нестабильности частоты генераторов в системах радиосвязи на качество передачи данных, которое определим, как вероятность ошибки при приеме одного бита информации. Нестабильность частоты генераторов передатчика и приемника приводит к изменению автокорреляционной функции сигналов. Вследствие суммарного отклонения частот генераторов от номинальных значений на величину  $\Delta f$ , амплитуда главного пика автокорреляционной функции (АКФ) равна, согласно [5], следующему выражению:

$$R(\tau, \Delta f) = \frac{1}{2E} \int_{-\infty}^{\infty} U_0(t) U_0^*(t - \tau) \exp(i \cdot 2\pi \cdot \Delta f \cdot t) dt \quad (1)$$

При  $\tau = 0$  относительное снижение уровня АКФ, которое определяется отклонением частоты генераторов, может быть определено как:

$$|R(0, \Delta f)| = \frac{\sin(2\pi \cdot \Delta f \cdot T/2)}{2\pi \cdot \Delta f \cdot T/2} \quad (2)$$

где  $T$  — длительность широкополосного сигнала (ШПС);  $*$  — знак комплексного сопряжения.

При допустимом снижении уровня амплитуды  $R(\Delta f)$  до 0,75, выражение (2) может быть аппроксимировано с помощью формулы:

$$|R(0, \Delta f)| = 1 - (\pi \cdot \Delta f \cdot T)^2 / 6 \quad (3)$$

На рис. 1 изображены зависимости (2) и (3), при  $T = 10^{-3}$  с.

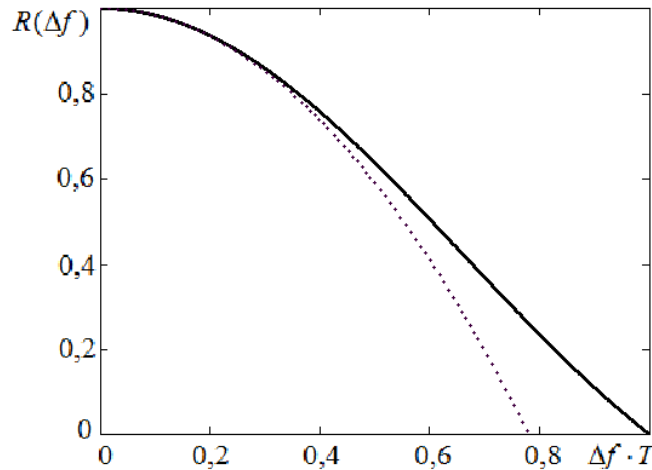


Рис. 1. Представление автокорреляционной функции ШПС: зависимость (2) — сплошная линия; зависимость (3) — штриховая линия

Приближение (3), которое следует из приведенных данных, имеет смысл при  $|\pi \cdot \Delta f \cdot T| \leq 0,4$ , что совпадает с возможным уменьшением амплитуды АКФ, как показано выше, до 0,75. Решение уравнения (3), являющегося квадратным, имеет простой вид, следовательно, становится возможным соединение допустимого отклонения частоты сигнала с допустимым уменьшением уровня сигнала на выходе устройства корреляционной обработки [6]:

$$\Delta f = \frac{\sqrt{6(1-R)}}{\pi \cdot T} \tag{4}$$

Обозначим  $f_0$  как несущую частоту, а  $B$  — базу ШПС-сигнала [1]:

$$B = F/R = F/2W, \tag{5}$$

где  $F$  — ширина спектра сигнала;  $R$  — скорость передачи информации;  $W$  — верхняя частота сообщения.

При условии применимости аппроксимации (3) и выражения (4) примем допустимое относительное отклонение частоты как

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\sqrt{6(1-R)}}{\pi \cdot T \cdot f_0} = \frac{\sqrt{6(1-R)} \cdot F}{\pi \cdot B \cdot f_0}. \tag{6}$$

На рис. 2 изображена зависимость допустимого относительного отклонения частоты, несущей ШПС, от величины допустимого снижения относительного уровня АКФ.

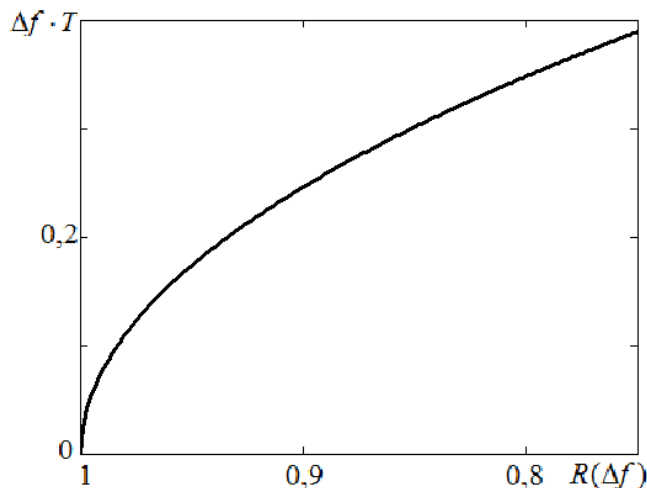


Рис. 2. Зависимость допустимого относительного отклонения частоты, несущей ШПС, от величины допустимого снижения амплитуды АКФ

К примеру, для несущей частоты  $f_0 = 1$  ГГц,  $F = 20$  МГц,  $B = 2 \cdot 10^4$  при допустимом снижении уровня АКФ до 0,89 (на минус 0,5 дБ) допустимое относительное отклонение частоты составляет  $2,6 \cdot 10^{-7}$ . Одновременно, допустимые отклонения частоты генераторов передатчика и приемника в случае, если они равны, будут составлять  $1,85 \cdot 10^{-7}$ . Если использовать более высокие диапазоны частот и/или увеличить базы сигнала, требования по снижению допустимого относительного отклонения частоты увеличатся на порядок и больше.

Отклонения частоты генераторов передатчика и приемника описываются нормальным законом распределения [7]. Следовательно, применяя хорошо известные зависимости между дисперсией распределения и отклонением частоты относительной нестабильности, вышеприведенные данные могут быть определены величиной  $5 \cdot 10^{-8}$ . При анализе результатов выясняется, что требуемая относительная нестабильность частоты сигналов в системах и устройствах систем сотовой связи для обеспечения качественной связи должна быть порядка  $10^{-7} \dots 10^{-8}$ .

**Заключение.** Проведенное исследование выявило взаимосвязь стабильности частоты генераторов и характеристик передачи информации в радиотехнических системах. Использование способов стабилизации частоты позволило добиться указанных значений стабильности для генераторов с собственной относительной нестабильностью  $10^{-6}$ . Стабильность генераторов при использовании второго способа повышена в  $\sqrt{N}$  раз ( $N$  — число генераторов в системе) и, соответственно, снижена вероятность битовой ошибки при передаче цифровой информации по каналу связи системы передачи данных. При этом требуемая для системы связи стабильность частоты генераторов достигается в системе из ста одновременно и независимо работающих генераторов. В системах сотовой связи число генераторов совпадает с числом абонентов и составляет тысячи в пределах каждой соты. Таким образом, предложенный способ позволяет без использования сложных и дорогостоящих высокостабильных опорных генераторов значительно повысить качество передачи данных, в том числе и качество связи.

#### Библиографический список.

1. Сафарьян, О. А. Метод статистической стабилизации частоты независимо работающих генераторов в инфокоммуникационных системах : дис. ... канд. техн. наук / О. А. Сафарьян. — Ростов-на-Дону, 2014. — 151 с.
2. Управление мониторингом движения маршрутного транспорта с использованием технологии Mobile Location Service / Н. В. Болдырихин [и др.] // Труды Северо-Кавказского филиала Московского Технического университета связи и информатики. — 2013. — № 1. — С. 61–65
3. Сафарьян, О. А. Моделирование процесса стабилизации частоты генераторов в инфокоммуникационных системах / О. А. Сафарьян // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 4 (87). — С. 150–154.
4. Устройство стабилизации частоты генераторов : патент 144228 Рос. Федерация : H03L 7/00 / О. А. Сафарьян, Д. Д. Габриэльян, В. В. Шацкий. — № 2014111456/08 ; заявл. 25.03.14 ; опубл. 10.08.14, Бюл. № 22. — С. 1–2.
5. Варакин, Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. — Москва : Радио и связь, 1985. — 384 с.



6. Сафарьян, О. А. Погрешность оценки частот генераторов в нестационарном случае при использовании статистического метода стабилизации частот / О. А. Сафарьян // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 4. — С. 23–25.

7. Сафарьян, О. А. Метод оценки частоты генераторов в условиях непрогнозируемого изменения длительности интервала измерений / О. А. Сафарьян // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — № 4 (79). — С. 142–149.