

## **Разработка методик оценки среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот и потока смены частот**

В.А. Иванов, Н.В. Рябова, М.И. Бастракова

*Поволжский государственный технологический университет  
г. Йошкар-Ола, пл. Ленина 3, [m.i.bast@mail.ru](mailto:m.i.bast@mail.ru)*

*В работе представлены методики расчета среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот и потока смены частот для декаметровых радиоканалов. По разработанным методикам приведены результаты моделирования энергетических характеристик на автоматизированных ионосферных радиоприемах для различных модемов, отношений сигнал/шум и групп частот.*

*Techniques and algorithms of calculation of reliability of reception on experimental data of inclined sounding ionosphere radio channels broadband LFM are presented by a signal. Modelling and an estimation of reliability of reception with the set reliability for modems decametre radio communications. Experimental approbation of the developed techniques and algorithms on decametre radiolines by extent 2.6-5.7Мм for various seasons of year and time of day is lead.*

### **Введение**

При передаче информации по высокочастотным (ВЧ) радиоканалам возникают ошибки в принимаемом сообщении, обусловленные влиянием условий распространения радиоволн, таких как замирания и многолучевость, а также воздействием различного рода шумов и помех [1,2,3]. Эти физические эффекты приводят к значительным искажениям принимаемого сигнала и ухудшают помехоустойчивость приема в системах радиосвязи. На ионосферных линиях радиосвязи помехоустойчивость определяется в основном отношением сигнал/шум (SNR) на входе приемника, которое подвержено регулярным изменениям за счет случайных изменений уровней сигнала и помех в условиях быстрых и медленных замираний и оценивается как случайная величина. С целью повышения помехоустойчивости радиосвязи применяется резервирование радиоканалов путем использования групп частот (Q) на одно или несколько радионаправлений. Смена частот и выбор новых рабочих частот из числа резервных могут производиться по различным критериям, но число смен частот и затраты времени на переходы должны быть минимальными [4,5]. Для наиболее рационального и эффективного использования частотно-энергетических, частотно-временных и частотно-пространственных резервов высокочастотного диапазона автоматизированными радиоприемами, использующими группы разрешенных частот, необходимо: вести непрерывный статистический контроль за качеством рабочего канала приема; выбирать в любой требуемый момент с наименьшими потерями времени новую доступную или «лучшую» частоту приема (по отношению сигнал/шум) из группы контролируемых и применимых по условиям распространения; переводить передатчик корреспондента на новую выбранную частоту приема.

**Цель работы:** разработать методики определения среднего энергетического выигрыша при использовании группы частот из диапазона рабочих частот и потока смены частот для автоматизированных радиоприемов. По разработанным методикам провести численное моделирование среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот и потока смены частот для различных модемов.

## 1. Методика определения среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот на автоматизированных ионосферных радиоприемах

В практике радиосвязи нередко среднее превышение отношения сигнал/шум (SNR) на данной частоте оказывается недостаточным для приема с заданной достоверностью. Это приводит к необходимости использовать группу частот в интересах одного или нескольких радионаправлений с автоматическим выбором оптимальной рабочей частоты в любой требуемый момент времени [6,7,8]. Методика определения среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот представляет следующую последовательность.

1.1. Определение интегральной функции распределения вероятностей превышения SNR некоторого допустимого значения:

$$Z = z_1 D(z_1 - z_{\text{ДОП}}) + z_2 D(z_{\text{ДОП}} - z_1) D(z_2 - z_{\text{ДОП}}) + \dots + z_Q D(z_{\text{ДОП}} - z_1) \dots D(z_{\text{ДОП}} - z_{Q-1}) D(z_Q - z_{\text{ДОП}}) + N(z_1, \dots, z_Q) \times \prod_{i=1}^Q D(z_{\text{ДОП}} - z_i)$$

где  $\bar{z}$  - среднее значение превышения SNR;

$\sigma_z$  - среднеквадратичное отклонение превышения SNR;

$z_{\text{доп}}$  - допустимое значение превышения SNR;

$Q$  - количество частот в группе частот,

$z_i$  - текущее значение SNR.

1.2. Нахождение интегральной функции распределения вероятностей превышения SNR:

$$P(Z' < Z) = F\left(\frac{Z - \bar{z}}{\sigma_z}\right) F^{Q-1}\left(\frac{z_{\text{доп}} - \bar{z}}{\sigma_z}\right) + D(Z - z_{\text{доп}}) \cdot \left[ F\left(\frac{Z - \bar{z}}{\sigma_z}\right) - F\left(\frac{z_{\text{доп}} - \bar{z}}{\sigma_z}\right) \right] \cdot \left[ 1 - F^{Q-1}\left(\frac{z_{\text{доп}} - \bar{z}}{\sigma_z}\right) \right] F^{-1}\left(\frac{z_{\text{доп}} - \bar{z}}{\sigma_z}\right)$$

1.3. Расчет плотности распределения вероятностей величины SNR при работе на любой доступной частоте из группы  $Q$  запишется в виде:

$$\omega_Q(Z) = \omega(Z) F^{Q-1}\left(\frac{z_{\text{доп}} - \bar{z}}{\sigma_z}\right) + \omega(Z) \left[ 1 - F^{Q-1}\left(\frac{z_{\text{доп}} - \bar{z}}{\sigma_z}\right) \right] \cdot \left[ F^{Q-1}\left(\frac{z - \bar{z}_{\text{доп}}}{\sigma_z}\right) \right],$$

где  $\omega(z)$  - логарифмически нормальная плотность распределения вероятностей величины SNR на любой одной случайно выбранной частоте.

1.4. Определение среднего значения величины SNR в рабочем канале:

$$(\bar{Z})_Q = \int_0^z Z \omega_Q(Z) dZ = H_{0,5} \exp\left(\frac{\sigma_z^2}{2M_1^2}\right) V(\xi, Q),$$

где  $V(\xi, Q) = F^{Q-1}(\xi) + \frac{1 - F^{Q-1}(\xi)}{F(-\xi)} F\left(\frac{\sigma_z}{M_1} - \xi\right)$  - промежуточная

функция для  $\xi = -\frac{z_\partial - \bar{z}}{\sigma_z}$ ,

$M_1 = 20 \lg(e)$  - коэффициент перехода от натуральных логарифмов к десятичным (при расчетах в децибелах),  $H_{0,5}$ -квантиль уровня  $Z$  при вероятности 0.5.

1.5. Нахождение среднего энергетического выигрыша  $\Delta Z$  ( $\Delta Z$ ) при использовании группы частот  $Q$  по сравнению с работой на одной частоте:

$$\Delta Z(Q, Z, \sigma_z, Z_\partial) = 20 \lg \frac{z_1^{(z)} Q}{z_1} = 20 \lg V(\xi, Q),$$

где  $z_1$  - превышение SNR при работе на одной текущей частоте,  
 $z_\partial$  - допустимое значение превышения SNR;  
 $z_Q$  - превышение SNR при работе на  $Q$  частотах.

Результаты моделирования среднего энергетического выигрыша от применения группы частот для некогерентного приема частотной телеграфии (ЧТ) с узкополосным трактом и систем связи, использующих сигналы с 8ФМ модуляцией по экспериментальным данным наклонного зондирования ионосферы ЛЧМ сигналом приведены на рис. 1.

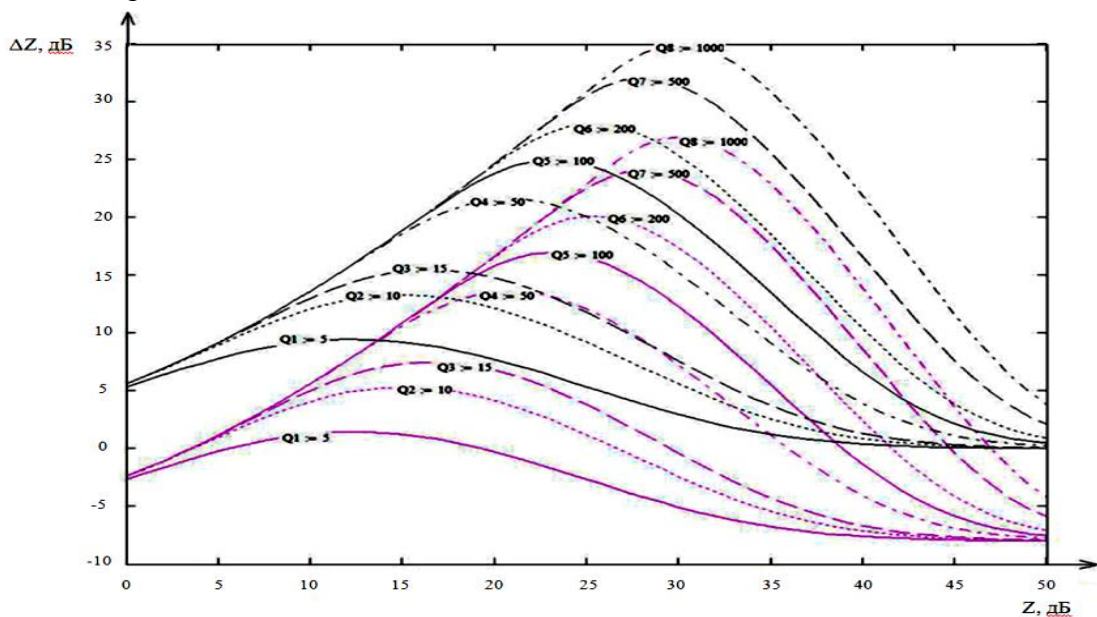


Рис. 1. Средний энергетический выигрыш для различных значений SNR и групп частот  $Q$  (при  $\sigma_z = 20$  дБ)

— для некогерентного приема ЧТ с узкополосным трактом;  
 - для систем связи, использующие сигналы с 8ФМ модуляцией

Моделирование среднего энергетического выигрыша проводилось для следующих групп частот  $Q = 5; 10; 15; 50; 100; 200; 500; 1000$  и СКО  $\sigma_z = 5; 10; 15; 20$  дБ. Установлено, что для систем связи, использующих сигналы с 8ФМ модуляцией средний энергетический выигрыш на 8 дБ выше, чем для узкополосного случая приема при одинаковых значениях превышения SNR из группы частот  $Q$ .

## 2. Методика определения потока смены частот при автоматической смене рабочей частоты

Процесс переходов на оптимальную рабочую частоту при работе в экстремальном (оптимальном) канале представляет собой случайный поток событий. Характеристикой такого потока является плотность, равная количеству переходов с частоты на частоту при работе системы связи в единицу времени, т.е. средней частоте переключений каналов (рабочих частот) [6,7,8].

Методика определения среднего количества переходов как плотность потока переходов состоит из следующих шагов:

2.1 Определение вероятности перехода за время  $\Delta t$  с рабочей частоты на любую доступную частоту из группы  $P_n(\Delta t)$ :

$$P_n(\Delta t) = P(z(t + \Delta t) < z_{\partial} / z(t) > z_{\partial}) = \frac{2T(\xi, \alpha)}{F(-\xi)},$$

где  $a = \frac{1 - R_z(\Delta t)}{\sqrt{1 - R_z^2(\Delta t)}}$ ;  $T(\xi, a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^a e^{-\frac{\xi^2}{2}(1+x^2)} \frac{dx}{1+x^2}$  - интегральная функция

двумерного нормального закона распределения;

$F(\xi)$  – интегральная функция распределения.

2.2. Нахождение нормированной корреляционной функции процесса  $z_i(t)$  [85]:

$$R_z(\Delta t) = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} R_x(\Delta t) + \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} R_y(\Delta t),$$

2.3. Определение среднего количества переходов как плотность потока переходов [85]:

$$K = \lim_{\Delta t \rightarrow \tau} \frac{P_i(\Delta t)}{\Delta t},$$

Среднее количество переходов в единицу времени в зависимости от относительного значения допустимого превышения SNR:  $\xi = -\frac{z_{\partial} - \bar{z}}{\sigma_z}$  и

корреляционной функции  $R_z(\Delta t)$  равно:

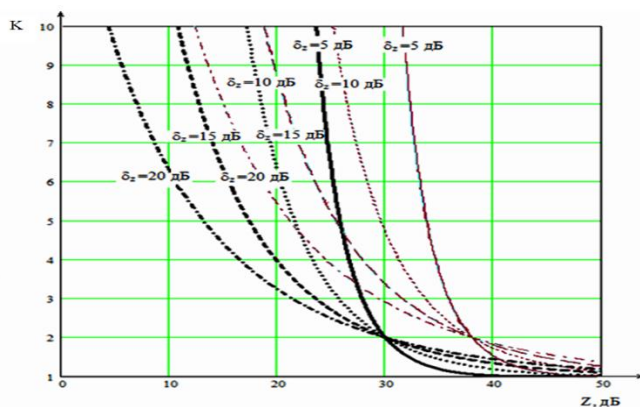
$$K(\xi, R_z(\Delta t)) = \exp(-\xi^2 / 2) F^{-1}(-\xi) K(0),$$

где  $K(0)$  - среднее количество пересечений процессом  $z(t)$  среднего уровня сверху вниз (или снизу вверх).

Таким образом, при использовании доступных частот среднее количество смен частот в единицу времени на автоматизированной радиолинии равно:

$$K = f(\xi) K(0)$$

По разработанной методике было проведено моделирование потока смены частот для модемов, использующих некогерентный прием ЧТ с узкополосным трактом и для систем связи, использующих сигналы с 8ФМ модуляцией для значения вероятности ошибок  $P_{\text{ош}} = 10^{-2}; 10^{-3}; 10^{-4}; 10^{-5}$  и СКО SNR равным 5; 10; 15 и 20 дБ. Результаты моделирования для вероятности ошибки  $P_{\text{ош}} = 10^{-3}$  представлены на рис. 2.



**Рис. 2. График зависимости количества переходов с одной частоты на другую от среднего превышения SNR при  $P_{\text{ош}} = 10^{-3}$  для различных значений среднеквадратичного отклонения  $\sigma_z$**

— для некогерентного приема ЧТ с узкополосным трактом;  
 - - - для систем связи, использующие сигналы с 8ФМ модуляцией

Результаты моделирования показали, что для обеспечения меньшей вероятности ошибок принимаемого сообщения при одинаковом числе переходов на «лучшую» частоту, требуется большее SNR. Например при узкополосном случае приема, при  $P = 10^{-4}$ ,  $z_{cp} = 30$  дБ,  $\sigma_z = 20$  дБ, число переходов  $K = 3$ , а при  $P = 10^{-3}$ ,  $z_{cp} = 30$  дБ,  $\sigma_z = 20$  дБ число переходов  $K = 2$ . С увеличением среднеквадратического отклонения SNR, т.е. вариаций уровня сигнала и шума в канале на 5дБ, в среднем, число переходов увеличивается в 2-3 раза. Для систем связи, использующих сигналы с 8ФМ модуляцией количество переходов на новую частоту меньше, чем для узкополосного случая приема при тех же значениях среднего значения SNR и среднеквадратического отклонения SNR.

### Выводы

Разработанные методики оценки среднего энергетического выигрыша при групповом использовании частот и потока смены частот дают возможность оценить, в какой степени, при том или ином варианте оптимизации радиолинии на основе автоматического выбора рабочей частоты из группы, удастся наиболее рационально использовать частотно-энергетические резервы рабочего диапазона частот. В результате численного моделирования установлено, что при применении сигналов с 8ФМ модуляцией наблюдается энергетический выигрыш по отношению SNR в сравнении с другими модемами (видами приема) при обеспечении одинаковой помехоустойчивости. Например, на радиолинии г.Иркутск – г.Йошкар-Ола,  $P_{\text{пр}}=0,95$ , выигрыш в отношении сигнал/шум на 14дБ больше по сравнению с энергетическим выигрышем при использовании некогерентного приема ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей и на 32дБ по сравнению с некогерентным приемом ЧТ с узкополосным трактом. Результатом является снижение на порядок значений допустимых вероятностей ошибок при приеме данных и мощностей излучения систем радиосвязи.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-07-00371-а; 13-02-00524-а; 15-07-05280; 15-07-05294), госзадания Министерства образования и науки РФ (проекты 8.2697.2014/К, 3.2695.2014/К).*

## Литература

1. Помехоустойчивость и пропускная способность радиоканалов ионосферной связи: научное издание / М.И. Бастракова, В.А. Иванов, Н.В. Рябова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013 – 172 с.
2. Головин О. В., Простов С. П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. / Под ред. О.В. Головина. М.: Горячая линия - Телеком, 2006.с.354.
3. Информационно-аналитическая система для исследования ионосферы и каналов декаметровый радиосвязи: Научное издание / А.Б. Егошин, В.А.Иванов, Д.В.Иванов, Н.В. Рябова. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. 323с.
4. Иванов В.А., Рябова Н.В., Бастракова М.И. Оценка надежности декаметровых систем передачи информации по экспериментальным данным панорамного зондирования ионосферы широкополосным сигналом. // Телекоммуникации 2010 № 2. Москва: Изд-во ОАО «Наука и технологии», 2010 С.12-27.
5. Иванов В.А., Рябова Н.В., Бастракова М.И. Экспериментальная оценка диапазонов оптимальных рабочих частот ионосферных радиолоний и скорости передачи данных декаметровых радиосистем. // Труды 15-й Международной н.-т конференции «Радиолокация, навигация и связь» .(RLNCC2010). Воронеж, 2010. С.367-373.
6. Бастракова М.И. Экспериментальное исследование диапазонов оптимальных рабочих частот декаметровых систем связи. // Вестник МарГТУ 2008 №2(3). Йошкар-Ола, 2008. С.3-12.
7. Иванов В.А., Рябова Н.В., Бастракова М.И. Экспериментальное исследование диапазонов оптимальных рабочих частот адаптивных дальних радиолоний по результатам панорамного зондирования ионосферы ЛЧМ сигналом. // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского 2010 № . Н. Новгород, 2010. С.53-61.
8. Иванов В.А., Рябова Н.В., Бастракова М.И. Оптимизация информационно-технических характеристик систем декаметровой радиосвязи для повышения их надежности// Вестник МарГТУ 2010 №2. Йошкар-Ола, 2010. С.21-27.