

УДК 621.396.9

## ФУНКЦИЯ ВРЕМЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ЗАМИРАЮЩИХ СИГНАЛОВ В ТРОПОСФЕРНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

**В.В. Серов**, главный научный сотрудник МНИРТИ, д.т.н.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость, замирания, корреляция, тропосферная система связи, код.

**Введение.** В системах тропосферной связи, где сигналы подвержены замираниям, приходится повышать помехоустойчивость передачи. Наиболее популярная мера – создание разнесенного приема с помощью параллельных каналов передачи. Кроме того, используется помехоустойчивое кодирование, эффективность которого зависит от свойств канала. В частности, существенным параметром, влияющим на исправляющую способность кодовой последовательности, является коррелированность замираний в соседних символах кода.

Известно, что декоррелировать замирания можно путем введения перемежения символов кодовой последовательности на передаче и последующего деперемежения на приеме. Однако для правильного выбора временного интервала перемежения необходимо знать параметры временной корреляции флуктуаций уровня принимаемого сигнала.

Статья посвящена рассмотрению характеристик функции временной корреляции случайного процесса на выходе тропосферного канала и их влиянию на помехоустойчивость приема при цифровой передаче кодированного сигнала. Функции корреляции построены на основании экспериментальных данных, полученных при натурных испытаниях тропосферной системы.

**Определение временной корреляции процессов.** В процессе испытаний были получены результаты на шести тропосферных трассах разной протяженности. Параметры трасс приведены в табл. 1.

Система тропосферной связи представляла собой радиолинию на частоте 4734 МГц, в которой применялись параболические зеркальные антенны диаметром 1,25 и 2,5 м.

Под временной корреляцией понимается среднее значение  $R_k(\tau)$  произведения нормированного случайного уровня

сигнала одной частоты на этот же сигнал, сдвинутый на интервал времени  $\tau$  [1]. Обозначим случайный уровень сигнала  $G(i)$ , где  $i$  – текущий момент времени.

Нормированная функция корреляции

$$R_k(\tau) = \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^N G(i)G(i-\tau) - m^2, \quad (1)$$

где  $m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G(i)$ ;  $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G(i)^2 - m^2$ ;  $N$  – объем выборки.

В результате обработки данных для всех испытанных трасс были получены функции временной корреляции, которые хорошо аппроксимируются функцией

$$R_k(\tau) = e^{-\frac{2\tau}{\tau_k}} \left( 1 + \frac{2\tau}{\tau_k} \right), \quad (2)$$

где  $T_k = \int_0^{\infty} R_k(\tau) d\tau$  – интервал корреляции.

Экспериментальные функции временной корреляции для трасс (табл. 1) представлены на рис. 1–6 (кривые с точками). На этих же рисунках сплошными линиями показаны аппроксимирующие зависимости, построенные по формуле (2), и интервал корреляции для каждой трассы.

Из рисунков видно, что на трассах различной длины и с разными размерами антенн интервал корреляции различен. Это связано с изменением размеров тропосферного объема переизлучения, зависящего как от размеров антенн, так и от расстояния. Мерой размеров объема переизлучения может служить разность задержек сигнала, пришедших от верхнего и нижнего краев объема. Края объема переизлучения определим по уровню половинной мощности относительно уровня, принятого из центральной части объема. Поскольку объем переизлучения образуется пересечением диаграмм направленности (ДН) антенн, то для получения сигнала приема по уровню 0,5 необходимо в расчет закладывать точку пересечения ДН по уровню  $\sqrt{0,5} = 0,707$ .

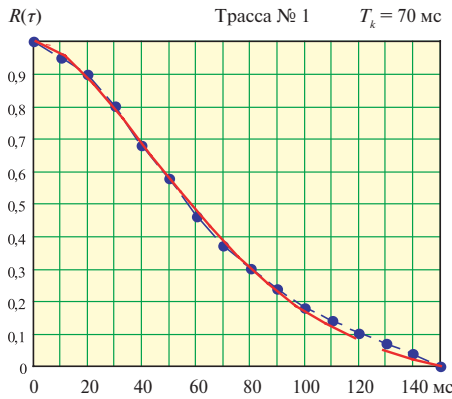


Рис. 1

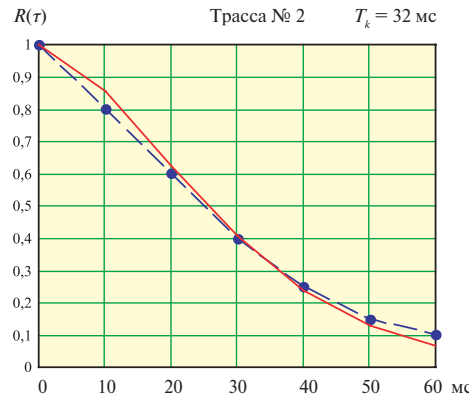


Рис. 2

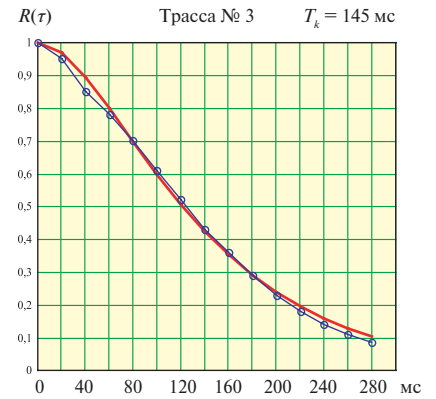


Рис. 3

Максимальную разность задержек сигнала, пришедших по нижнему и верхнему пути, ограниченному ДН антенн, можно получить из рис. 7, на котором показано геометрическое представление тропосферной трассы: расстояние AC –  $r_1$ ; CB –  $r_1'$ ; AD –  $r_2$ ; DB –  $r_2'$ ; AB –  $r$ ;  $\alpha_1$  – угол подъема нижнего края ДН, измеряемого по уровню мощности 0,707;  $\alpha_2$  – угол ДН по уровню мощности 0,707. Пересечение ДН по этому уровню в точках С и D определяют границы объема переизлучения по уровню 0,5 излучаемой мощности.

Из геометрических построений можно получить разность расстояний  $\Delta r = ADB - ACB$ :

$$\Delta r = r_2 + r_2' - r_1 - r_1', \quad (3)$$

$$\text{где } r_1 = \frac{r}{2 \cos\left(\frac{\pi}{180} \alpha_{1A}\right)}; r_2 = \frac{r}{2 \cos\left(\frac{\pi}{180} \alpha_{1A} + \alpha_2\right)}$$

$$\alpha_{1A} = \frac{r}{2Ae} + \alpha_{\text{зак}A}; \alpha_{\text{зак}A} - \text{угол закрытия горизонта в пункте А;}$$

$$r_1' = \frac{r}{2 \cos\left(\frac{\pi}{180} \alpha_{1B}\right)}; r_2' = \frac{r}{2 \cos\left(\frac{\pi}{180} \alpha_{1B} + \alpha_2\right)}$$

$$\alpha_{1B} = \frac{r}{2Ae} + \alpha_{\text{зак}B}; \alpha_{\text{зак}B} - \text{угол закрытия горизонта в пункте В;}$$

$Ae = 8500$  км – эквивалентный радиус Земли;

$\alpha_2 = \alpha_0 / 1,387$  – угол ДН по уровню мощности 0,707;

$\alpha_0 = 70 \frac{\lambda}{D}$  – угол ДН по половинной мощности;  $\lambda$  – длина

волны;  $D$  – диаметр антенны.

Разность задержек

$$\Delta t = \Delta r / c, \quad (4)$$

где  $c = 300\,000$  км/с – скорость света.

В процессе испытаний определены значения временной корреляции замираний на различных трассах, приведенные в табл. 1. Там же указаны длительности максимальных задержек сигналов для данных трасс, полученные с помощью формул (3)–(4).

Зависимость интервала корреляции от разности задержек сигналов, пришедших от краев объема переизлучения, показана на рис. 8 (кружками нанесены интервалы корреляции  $T_k$  в зависимости от длительности задержки  $\Delta t$ , рассчитанной с учетом истинных углов закрытия (табл. 1), а квадратными символами – без их учета). Из рисунка видно, что имеет место тенденция к уменьшению  $T_k$  при увеличении  $\Delta t$ . При этом учет углов закрытия не существенно влияет на исследуемую зависимость.

На том же рисунке сплошной линией нанесена кривая  $T_k(\Delta t)$ , которая достаточно хорошо аппроксимирует рассматриваемую зависимость

$$T_k(\Delta t) = 250 e^{-\left(\frac{\Delta t}{150}\right)} + 10. \quad (5)$$

Таблица 1

Диаметр антенны, м	Трасса, км	Угол закрытия, градус		Длительность задержки $\Delta t$ , нс	Интервал корреляции $T_k$ , мс
		$\alpha_{\text{зак}A}$	$\alpha_{\text{зак}B}$		
1,25	84	0,1	0,2	600	70
	119	0,15	0,15	880	32
2,5	73	0,2	0,3	118	145
	83	0,6	0,45	135	200
	122	0,15	0,3	200	115
	139	0,3	0,6	460	52,5

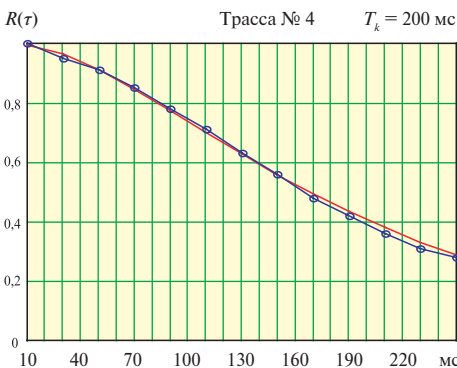


Рис. 4

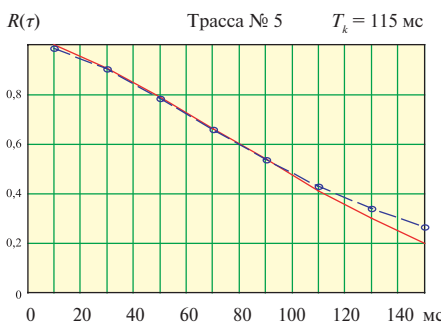


Рис. 5

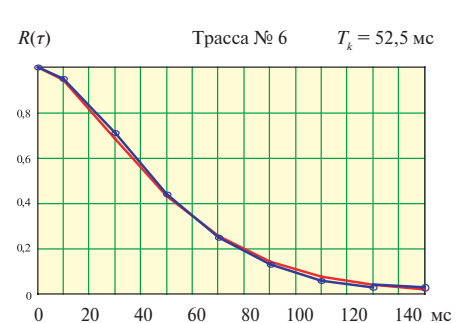


Рис. 6

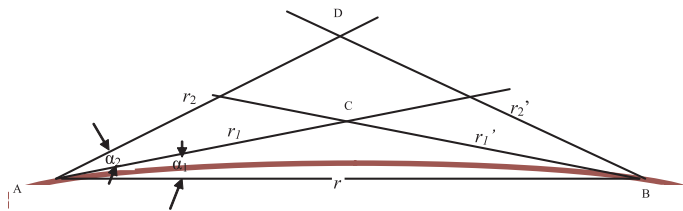


Рис. 7

Поскольку объем переизлучения зависит от угла ДН антенны и расстояния связи, то можно построить зависимость интервала корреляции от этих двух параметров.

На рис. 9 представлен трехмерный график, характеризующий зависимость интервала корреляции от дальности связи  $r$  и диаметра антенн  $D$  на частоте 4734 МГц. На рис. 10 приведена та же зависимость в двумерном изображении и нанесены линии равных значений  $T_k$ . Рис. 11 иллюстрирует зависимость временных интервалов  $\tau$  (в миллисекундах) с корреляцией сигнала  $R(\tau)=0,9$  от дальности связи  $r$  и диаметра антенн  $D$  на частоте 4734 МГц.

Из рис. 10 и 11 можно определить временной интервал, на котором корреляция символов  $R(\tau)=0,4$  (рис. 10) и  $0,9$  (рис. 11) на трассе определенной длины при антенне диаметром  $D$  метров. Например, в линии с антеннами диаметром 1,25 м на дальности связи  $r > 85$  км интервал корреляции  $T_k < 50$  мс ( $R(\tau) = 0,4$ ), а временной интервал с корреляцией символов  $R(\tau) = 0,9$  равен  $\tau < 12,5$  мс. С антеннами диаметром 2,5 м те же временные интервалы корреляции получим на трассах более 310 км.

**Помехоустойчивость цифровой линии тропосферной связи при кодированной передаче информации с учетом коррелированности символов в кодовой последовательности.** Рассмотрим станцию тропосферной радиосвязи, состоящую из одной антенны и одного приемопередающего тракта. Для борьбы с замираниями в линии с одним стволом приема-передачи обычно используется метод частотного разнесения. Система с частотным разнесением может быть построена с применением многочастотных сигналов (МЧС) или с помощью принципа автовыбора оптимальной частоты (ОЧ) [2]. Причем на этих частотах флуктуации уровня сигнала независимы и подчиняются закону Рэлея.

Между такими системами с точки зрения применения помехоустойчивого кода принципиальной разницы нет. По энергетическим показателям система с выбором ОЧ имеет преимущество перед системой с МЧС. Поэтому ниже исследуем влияние корреляции символов кода на примере системы с выбором ОЧ.

Рассмотрим помехоустойчивость передачи с помощью алгоритма детектирования Витерби в адаптивной системе с

выбором ОЧ при наличии корреляции символов сверточного кода с кодовым ограничением 7 и скоростью передачи 1/2. Этот код имеет порождающие многочлены, записанные в восьмеричной форме (171, 133) [3].

Характеристикой помехоустойчивости являются зависимости вероятности ошибки от отношения среднего значения мощности сигнала к мощности шума, измеренного в полосе информационного (некодированного) сигнала. Такие зависимости могут быть получены путем математического моделирования системы, поскольку теоретических формул для интересующего нас случая нет. При моделировании использован пакет программ Matlab – Simulink.

**Моделирование.** В качестве источника замирающего сигнала взят модуль, формирующий огибающую нормального случайного процесса с корреляционной функцией (2). При создании модуля использован моделирующий алгоритм для такой функции из [4]. Изменяя параметр, определяющий степень корреляции соседних выборок случайного процесса, можно получить реализации с разным интервалом корреляции.

При моделировании определялась вероятность ошибки от среднего отношения сигнал/шум при различном коэффициенте корреляции флуктуаций мощности сигнала в соседних символах кода  $R(1)$ . Моделирование проводилось для систем с выбором ОЧ и МЧС при различном числе частот  $N$ . По результатам моделирования были построены зависимости среднего отношения сигнал/шум, необходимого для обеспечения вероятности ошибки  $10^{-4}$ , от коэффициента корреляции соседних символов кодовой последовательности в системе с автовыбором ОЧ из  $N$  частот при кодированной передаче.

Для когерентного приема ФМ-сигнала эти зависимости приведены на рис. 12, а для корреляционного приемника ОФМ – на рис. 13. Из рисунков можно сделать следующие выводы. При увеличении степени корреляции помехоустойчивость уменьшается. Степень уменьшения для корреляционного приемника ОФМ (рис. 13) приведена в табл. 2.

Из таблицы следует, что при коэффициенте корреляции  $R(1) = 0,9$  потери помехоустойчивости не превышают 1дБ. Это означает, что, применяя перемежение символов кодовой последовательности для декорреляции замираний в соседних символах до величины  $R(1)=0,9$ , можно получить канал практически без снижения помехоустойчивости.

Длительность интервала перемежения можно определить с помощью графиков, приведенных на рис. 11. Например, в линии тропосферной связи протяженностью 100 км на частоте 4734 МГц с антенной диаметром 1,25 м интервал перемежения может быть взят 10 мс. При этом корреляция сигналов в соседних символах кодовой последовательности не превысит  $R(1) = 0,9$ . На линии большей дальности степень

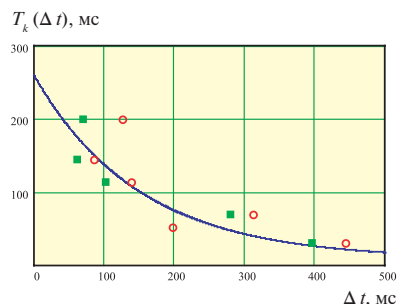


Рис. 8

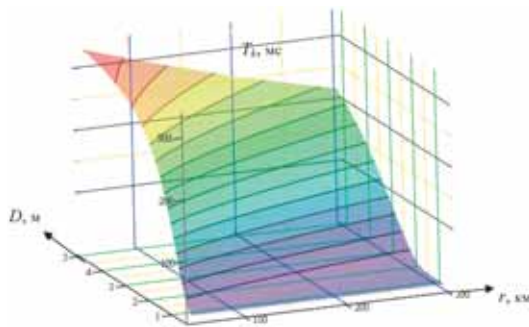


Рис. 9

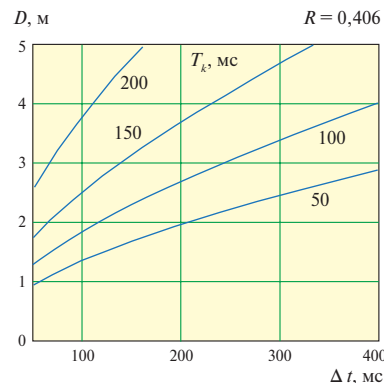


Рис. 10

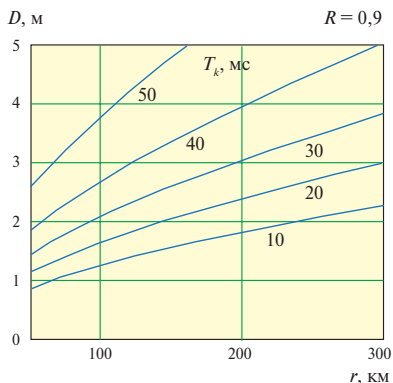


Рис. 11

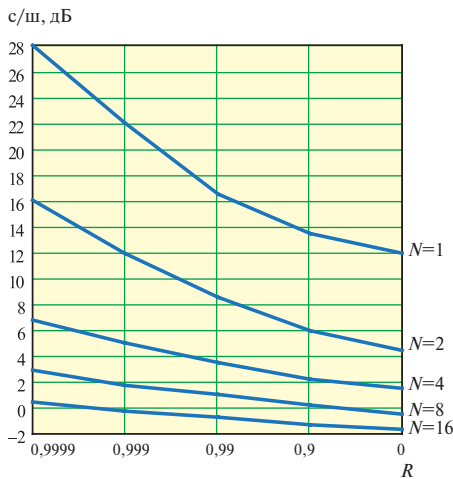


Рис. 12

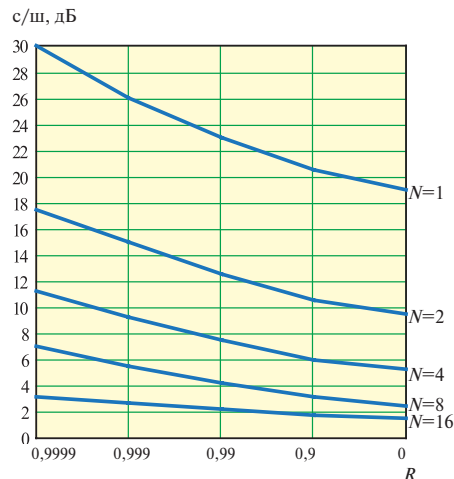


Рис. 13

Таблица 2

Число частот	Потери сигнал/шум, дБ				
	$R(1) = 0$	$R(1) = 0,9$	$R(1) = 0,99$	$R(1) = 0,999$	$R(1) = 0,9999$
1	0	1	4	7	11
2	0	1	3	5,5	8
4	0	0,7	2,2	3,9	6
8	0	0,5	1,7	3,0	4,5
16	0	0,3	0,7	1,2	1,7

корреляции будет еще меньше. В системе с большим числом частот автовыбора ( $N = 8$  и  $16$ ) допустима более высокая корреляция сигналов в соседних символах. Потери помехоустойчивости при  $R(1) = 0,99$  будут невелики.

Выводы, сделанные для системы с выбором ОЧ, справедливы и для системы с МЧС. Для сокращения материала статьи результаты моделирования системы с МЧС здесь не приводятся.

**Заключение.** В тропосферных линиях связи большой интерес представляют временные корреляционные характеристики процессов, влияющие на исправляющую способность помехоустойчивых кодов. При коэффициенте корреляции в соседних символах меньше 0,9 потери помехоустойчивости малы. Такой корреляции можно достичь путем перемежения символов кода. Результаты работы позволяют определить необходимую длительность интервалов перемежения в зависимости от коэффициента усиления антенн и протяженности интервала.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Сов. радио, 1966 .
2. Мацков А.А., Серов В.В., Чернобельский Л.И. Принципы горизонтальной связи. // Электросвязь. — 2006. — № 6. — С 33.
3. Кларк Дж. Мл., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1987.
4. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1971.

Получено после доработки 16.08.12

**Памяти Всеволода Владимировича Серова**

**10 марта 2013 года на 78-м году жизни после продолжительной и тяжелой болезни ушел из жизни один из ведущих и уникальных специалистов радиосвязи в нашей стране, доктор технических наук, капитан первого ранга в отставке Всеволод Владимирович Серов.**

После окончания в 1959 году Военно-воздушной Академии им. А.Ф. Можайского Всеволод Владимирович более 50 лет проработал в МНИРТИ.

В.В. Серов был активным участником и Главным конструктором всех без исключения станций тропосферной связи, находящихся на вооружении МО РФ и ФСО России, а также опорных сетей тропосферной связи «Барс» и «Север-Т». Последней работой Всеволода Владимировича стала станция «Ладья», принцип работы которой защищен российским патентом.

Всеволод Владимирович был крупнейшим специалистом страны в области тропосферной связи, его перу принадлежит более 40 научных трудов и изобретений. Предложенные им новые технические решения позволили



создать отечественные станции тропосферной связи, не имеющие зарубежных аналогов.

Блестящий специалист, Всеволод Владимирович обладал большими организаторскими способностями. В разные годы он успешно руководил внедрением целого ряда разработок как в нашей стране, так и за рубежом.

За большой личный вклад в создание средств тропосферной связи В.В. Серов был удостоен множества государственных наград и званий.

Память о Всеволоде Владимировиче Серове – талантливом ученом, блестящем организаторе, опытном руководителе, человеке высокой культуры, верном и добром товарище – навсегда сохранится в сердцах его коллег и друзей.