

**Вершинин Александр Сергеевич**

инженер

Институт неразрушающего контроля

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский

Томский политехнический университет»

г. Томск, Томская область

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛА С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ КОДИРОВАНИЕМ СИГНАЛОВ

**Аннотация:** в статье рассматривается математическая модель канала с пространственным кодированием сигналов. Приводятся математические выражения, описывающие радиоканал с несколькими передающими антеннами и несколькими приемными антеннами. Показан результат реализации описанной математической модели.

**Ключевые слова:** математическая модель, радиоканал, кодирование, сигнал, система связи.

Для ММО (Multiple input multiple output) систем характерно увеличение скорости передачи данных по линейному закону с ростом числа независимых каналов приема и передачи. Известно, что основной причиной, снижающей скорость передачи данных, является влияние канала распространения радиоволн (РРВ) [1; 2].

В реальности на приземных трассах наблюдается многолучевое распространение. Обзор моделей канала РРВ для современных систем связи показывает, что на городских трассах в диапазоне частот 2–3 ГГц характерно многолучевое распространение с количеством лучей от 3 до 12.

Импульсная характеристика канала РРВ между q-ой передающей антенной и p-ой приемной в таком случае записывается в виде:

$$g_{qp}(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N_m(t)-1} \gamma_{i,qp}(t) \exp(-j\phi_{i,qp}(t)) \delta(\tau - \tau_{i,qp}(t)).$$

где  $q$  – номер приемной антенны;  $p$  – номер передающей антенны;  $i$  – номер пути распространения радиоволн;

$\gamma$  – коэффициент ослабления  $i$ -го пути в канале между  $p$  и  $q$  антеннами;

$\varphi$  – случайная фаза  $i$ -го пути в канале между  $p$  и  $q$  антеннами;

$\delta(t)$  – дельта-функция;

Передаточная функция канала РРВ:

$$g_{qp}^F(f, t) = F\{g_{qp}(f, t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g_{qp}(t, \tau) \exp(-j2\pi f \tau) d\tau.$$

Частотная корреляционная функция:

$$R_{qp}(\Delta f, t) = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} g_{qp}^F(f, t) (g_{qp}^F(f + \Delta f, t))^* df.$$

Модель канала в дискретном времени может быть записана в виде:

$$g_{qp}(nT_s, lT_s) = \int_0^{\tau_{N_m}(nT_s)-1, qp} f(lT_s - \tau) g_{qp}(nT_s, \tau) d\tau = \sum_{i=0}^{N_m(nT_s)-1} \gamma_{i, qp}(nT_s) \exp(-j\phi_{i, qp}(nT_s)) f(lT_s - \tau_{i, qp}(nT_s)),$$

где  $f(\tau) = f_{TX}(\tau) * f_{RX}(\tau)$ , а  $f_{TX}(\tau)$ ,  $f_{RX}(\tau)$  – импульсные характеристики передающей и приемной частей системы.

Модель канала можно представить в виде блок-схемы, рисунок 1.

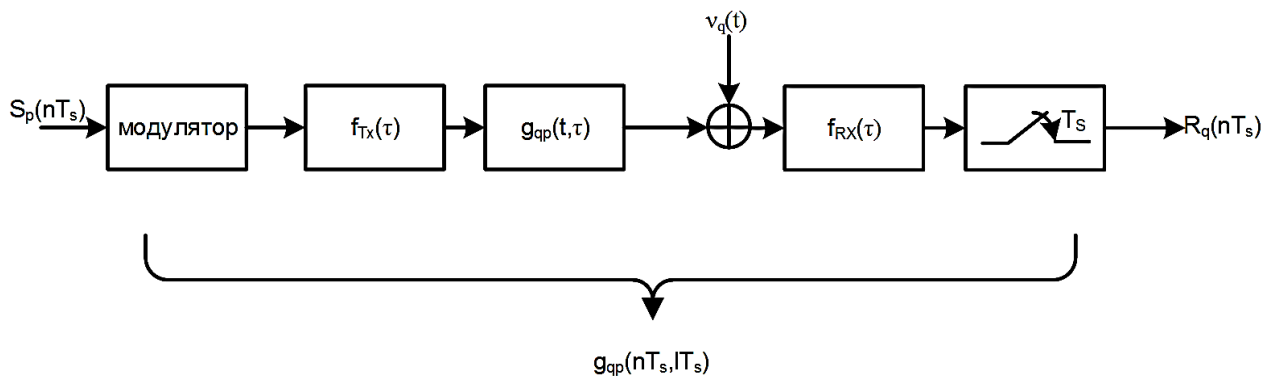


Рис. 1. Блок-схема многолучевого канала ММО

В предположении, что передающий и приемный фильтры являются идеально пропускающими, получим, что импульсная характеристика канала РРВ может быть записана в виде:

$$g_{qp}(nT_s, lT_s) = \sum_{i=0}^{N_m(nT_s)-1} \gamma_{i, qp}(nT_s) \exp(-j\phi_{i, qp}(nT_s)) \sin\left(\pi \cdot c \left(l - \frac{\tau_{i, qp}(nT_s)}{T_s}\right)\right),$$

$$\mathbf{S}(t) = \begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ \vdots \\ S_{N_t}(t) \end{pmatrix}, \mathbf{R}(t) = \begin{pmatrix} R_1(t) \\ R_2(t) \\ \vdots \\ R_{N_r}(t) \end{pmatrix}, \mathbf{G}(t, \tau) = \begin{pmatrix} g_{11}(t, \tau) & g_{12}(t, \tau) & \cdots & g_{1N_r}(t, \tau) \\ g_{21}(t, \tau) & g_{22}(t, \tau) & \cdots & g_{2N_r}(t, \tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_t1}(t, \tau) & g_{N_t2}(t, \tau) & \cdots & g_{N_tN_r}(t, \tau) \end{pmatrix}.$$

Таким образом, получена модель сигнала на выходе многоканальной антенной системы с несколькими приемными антеннами для случая, когда ведется параллельная передача сигналов с использованием технологии MIMO.

Ниже приведен рисунок 2, иллюстрирующий процесс параллельной передачи данных. Фазовый фронт волны от каждой из передающих антенн искажен влиянием канала PPB [3; 4].

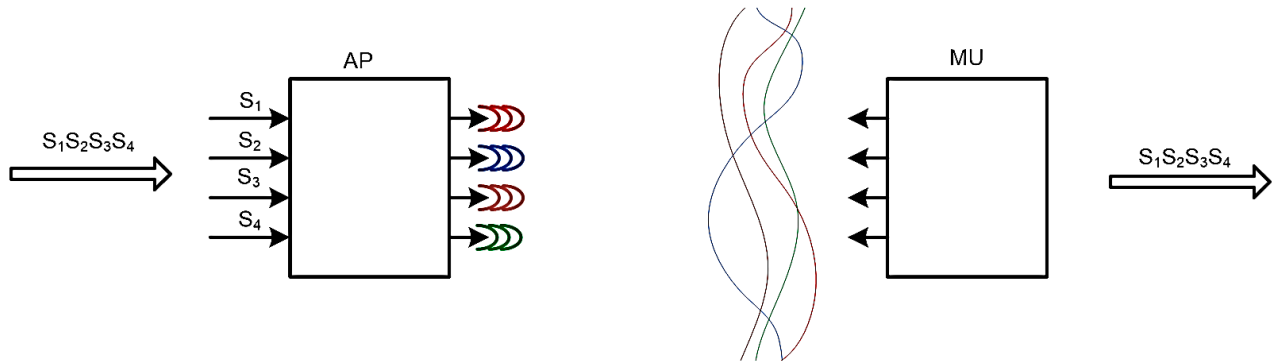
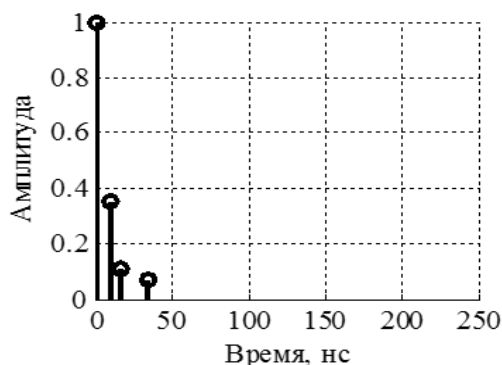


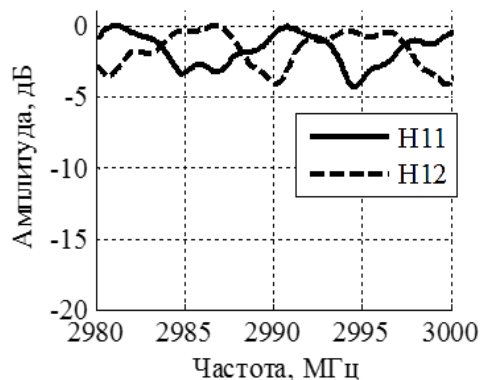
Рис. 2. Процесс параллельной передачи данных

Важным параметром в системах беспроводного широкополосного доступа, использующих технологию MIMO, является параметр канала распространения радиоволн.

Для моделирования использовались модели каналов, рекомендованные международным союзом электросвязи. На рисунке 3 показаны реализации модели канала PPB.



Импульсная характеристика  
канала РРВ



Передаточная функция  
канала РРВ

Рис. 3. Характеристика канала РРВ №1 с медленными  
частотными замираниями

Описанная математическая модель может быть использована для моделирования беспроводных систем связи. Математическая модель учитывает многолучевую структуру канала распространения радиоволн и пространственное расположение передающих и приемных антенн.

Работа выполнена за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

### **Список литературы**

1. Гуревич А.В. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн / А.В. Гуревич, Е.Е. Цедилина. – 1979.
2. Скляр Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение / Вильямс. – 2004.
3. Виноградова М.Б. Основы теории распространения ультракоротких радиоволн в тропосфере / М.Б. Виноградова, А.А. Семенов; изд-во Академии наук СССР. – 1963.
4. Старр А.Т. Радиотехника и радиолокация. – М.: Советское радио. – 1960.