

## РАДИОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396

Проценко М.Б., Рожновская И.Ю.  
Проценко М.Б., Рожновська І.Ю.  
Protsenko M.B., Rozhnovskaya I.Yu.

### АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАДИОКАНАЛА ДЛЯ MIMO-СИСТЕМ

### АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РАДІОКАНАЛУ ДЛЯ MIMO-СИСТЕМ

### ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF RADIO CHANNEL FOR MIMO-SYSTEMS

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования математических моделей непрерывного канала радиосвязи. Особенностью введенной классификации является взаимосвязь множества математических моделей канала с учетом различных видов помех и выделение наиболее общих моделей для описания MIMO-систем. Ключевые слова: радиоканал, математическая модель радиоканала, технология MIMO, многолучевой канал, помеха.

**Анотація.** У статті надані результати дослідження математичних моделей неперервного каналу радіозв'язку. Особливістю введеної класифікації є взаємозв'язок математичних моделей каналу з урахуванням різних видів завад і виділення найбільш загальних моделей для опису MIMO-систем. Ключові слова: радіоканал, математична модель радіоканалу, технологія MIMO, багатопроменевий канал, завада.

**Summary.** The research results of mathematical models for continuous radio communication channel are presented in the article. The peculiarity of the classification is the relation of different mathematical models to the considered types of interferences and selection of the most general models for description of the MIMO-systems. Keywords: radio channel, mathematical model of radiochannel, MIMO Technology, multipath channel, interference.

Перспективы совершенствования систем радиосвязи определяются главным образом требованиями рынка, спросом на новые виды услуг, высокоскоростной передачей данных и объемом передаваемой информации. Все это свидетельствует о необходимости дальнейшего развития систем беспроводной связи в направлении значительного увеличения их пропускной способности при обеспечении высокого качества предоставляемых высокоскоростных услуг, что является на сегодняшний день важной проблемой. В настоящее время в основном определены этапы развития систем беспроводной связи на ближайшую перспективу. В частности, предлагается увеличение эффективности использования радиочастотного спектра в сети радиодоступа на основе применения MIMO (multiple input multiple output) технологии – применения приемо-передающих антенн с многоканальным входом и выходом. При этом теоретической основой MIMO технологии является теория пространственно-временной обработки сигналов, которая описывает методы оптимального приема сигналов с учетом пространственно-временной, пространственно-поляризационной структуры электромагнитного поля.

Особенностью таких радиосистем является тот факт, что выигрыш в повышении скорости передачи информации обеспечивается только в условиях многолучевого радиоканала, для моделирования которого используются разнообразные по форме и содержанию математические модели [1...6]. Однако сложность оптимального выбора адекватной математической модели радиоканала обусловлена разнородностью сведений в научной литературе, использованием различных обозначений, отсутствием четкой иерархии данных математических моделей, что существенно затрудняет возможность проследить используемые приближения и, соответственно, их ограничения. Другими словами, в литературе отсутствует единый подход к описанию математических моделей радиоканала и их классификация.

Таким образом, целью данной работы является анализ и обобщение (классификация) математических моделей непрерывных каналов связи для их дальнейшего использования при описании MIMO-систем.

Любой дискретный радиоканал всегда образуется на основе некоторого непрерывного радиоканала, который представляет собой участок линии передачи от выхода модулятора до входа демодулятора, включая физическую среду с соответствующими входными и выходными (например,

антенными) устройствами. В подавляющем большинстве при описании непрерывного радиоканала прибегают к феноменологическому подходу моделирования [1], т.е. радиоканал обычно рассматривают как линейный четырехполюсник с определенной передаточной функцией или импульсной характеристикой. Физические процессы, происходящие в канале, определяют изменения, которые претерпевает сигнал на пути от передатчика к приемнику. На сигнал действуют как аддитивные, так и мультипликативные помехи, обусловленные изменениями параметров канала.

Обобщая на самом верхнем уровне известные математические модели для описания существующих непрерывных каналов связи, можно выделить детерминированные, структурно-детерминированные (примерами могут служить модели каналов со случайными амплитудой и фазой, со случайной импульсной характеристикой [1, 2]) и стохастические модели (рис. 1).

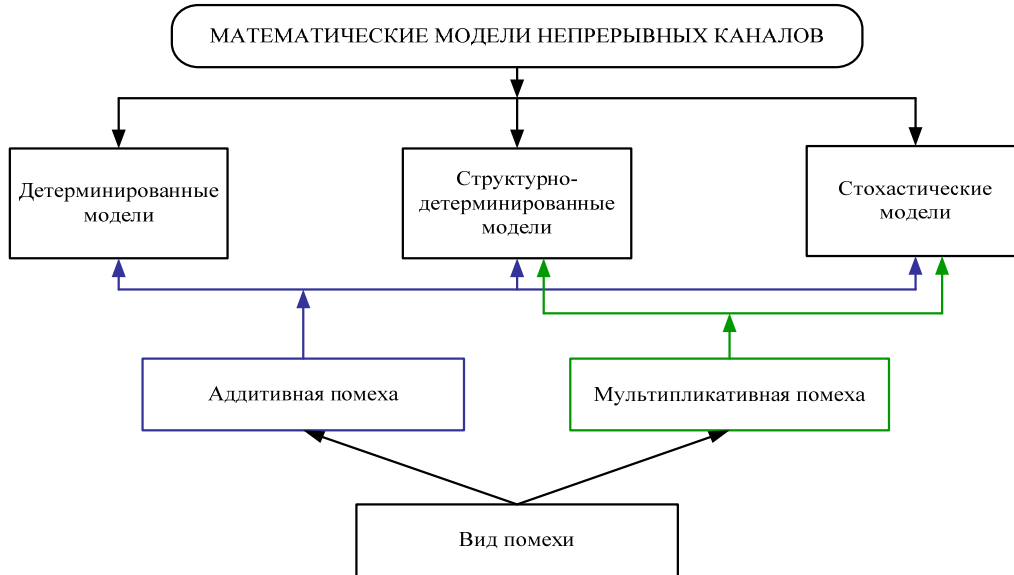


Рисунок 1 – Классификация моделей непрерывных каналов

К детерминированным моделям (рис. 2) относятся модели каналов, в которых преобразование входного сигнала детерминировано, присутствуют только аддитивные помехи, т. е. отсутствуют неаддитивные случайные помехи.

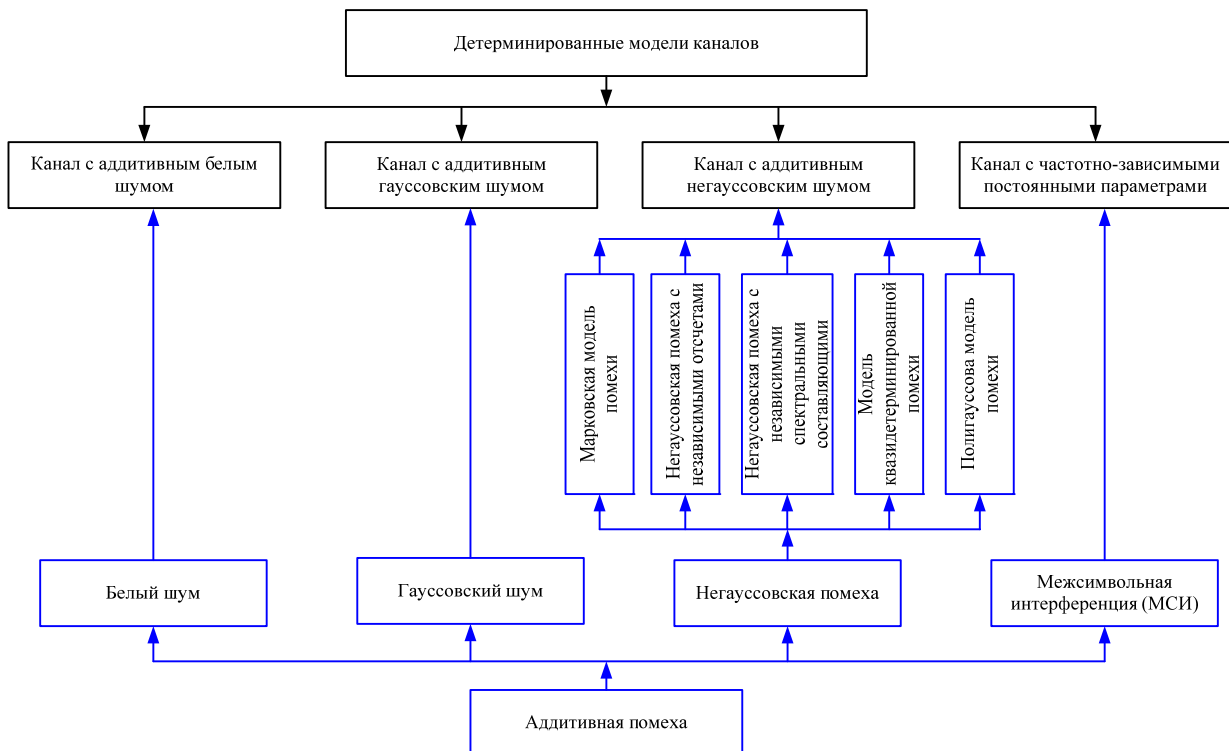


Рисунок 2 – Классификация детерминированных моделей непрерывных каналов

К моделям такого типа относятся: канал с аддитивным белым шумом; канал с аддитивным гауссовским шумом; канал с аддитивным негауссовским шумом [2].

Обобщенное математическое описание таких каналов можно представить в виде

$$u(t) = \mu \sum_{k=0}^{N-1} s_{r_k}(t - \tau - kT) + \xi(t), \quad 0 < t < \infty, \quad (1)$$

где  $u(t)$  – принимаемый сигнал с помехой;  $s_{r_k}(t)$  – известные реализации сигналов на приеме;  $\mu$  – известный постоянный коэффициент передачи канала;  $N$  – число символов, переданных в сеансе связи;  $r_k = (0, 1, \dots, M-1)$  – последовательность  $M$ -ичных информационных символов,  $M \geq 2$ ;  $\tau$  – известное постоянное время запаздывания сигнала;  $T$  – длительность передаваемых элементов сигнала;  $\xi(t)$  – случайная аддитивная помеха, которая может быть представлена в виде «белого шума», гауссовского процесса с известной корреляционной функцией или аддитивной негауссовской помехой.

В зависимости от модели негауссовской помехи различают пять моделей каналов [2]: с марковской моделью помехи; с негауссовской помехой с независимыми отсчетами; с негауссовской помехой с независимыми спектральными составляющими; с моделью квазидетерминированной помехи; с полигауссовой моделью помехи.

Особое место в данной классификации занимает математическая модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) и аддитивным шумом (с частотно-зависимыми постоянными параметрами) [2, 7]

$$u(t) = \int_0^{\infty} g(t - \tau) \sum_{k=0}^{N-1} s_{r_k}(\tau - kT) d\tau + \xi(t), \quad 0 < t < \infty, \quad (2)$$

где  $g(\tau)$  – известная импульсная реакция канала связи; остальные обозначения такие же, как и в формуле (1).

Рассматриваемая в данном случае МСИ является детерминированной помехой, потому что при заданной информационной последовательности и известной импульсной характеристике канала принимаемый сигнал определен однозначно, с точностью до аддитивного шума.

К типу структурно-детерминированных моделей относятся модели каналов, где за основу берется некоторая детерминированная модель, в которой часть параметров или характеристик заменяется соответствующими случайными величинами или функциями. Помимо аддитивных помех в однолучевых каналах возникают замирания, которые заключаются в более или менее быстрых случайных изменениях передаточной функции канала, мультипликативные помехи, такие как рэлеевские замирания, общие (гладкие) замирания, селективные замирания, которые характерны для многолучевых каналов радиосвязи [3]. Классификация основных структурно-детерминированных моделей каналов с учетом различных видов помех показана на рис. 3.

К структурно-детерминированным моделям каналов (рис. 3) относятся: канал с неопределенной фазой и гауссовской аддитивной помехой с равномерным спектром; канал с неопределенной фазой и аддитивным коррелированным гауссовским шумом; канал с неопределенной фазой и негауссовским шумом [2], обобщенное математическое описание которых можно представить в виде

$$u(t) = \mu \sum_{k=0}^{N-1} [s_{r_k}(t - \tau - kT) \cos \varphi_k + s_{r_k}(t - \tau - kT) \sin \varphi_k] + \xi(t), \quad (3)$$

где  $s_{r_k}(t)$  – сигнал сопряженный с  $s_{r_k}(t)$ ;  $\varphi_k$  – случайная начальная фаза  $k$ -го элемента; остальные обозначения такие же, как и в формуле (1). В зависимости от модели негауссовской помехи различают три модели каналов [2]: с негауссовской помехой с независимыми отсчетами; с негауссовской помехой с независимыми спектральными составляющими; с моделью квазидетерминированной помехи.

Также к структурно-детерминированным моделям каналов относится модель канала с неопределенной фазой, частотно-зависимыми параметрами и белым шумом, которая математически представлена в виде [2]

$$u(t) = \int_0^t g(t - \tau) \left[ \sum_{k=0}^{N-1} s_{r_k}(\tau - kT) \cos \varphi + \sum_{k=0}^{N-1} s_{r_k}(\tau - kT) \sin \varphi \right] d\tau + \xi(t), \quad (4)$$

где  $\varphi$  – случайная фаза на всех элементах сеанса связи;  $\xi(t)$  – белый шум; остальные обозначения такие же, как и в формулах (1) и (2).

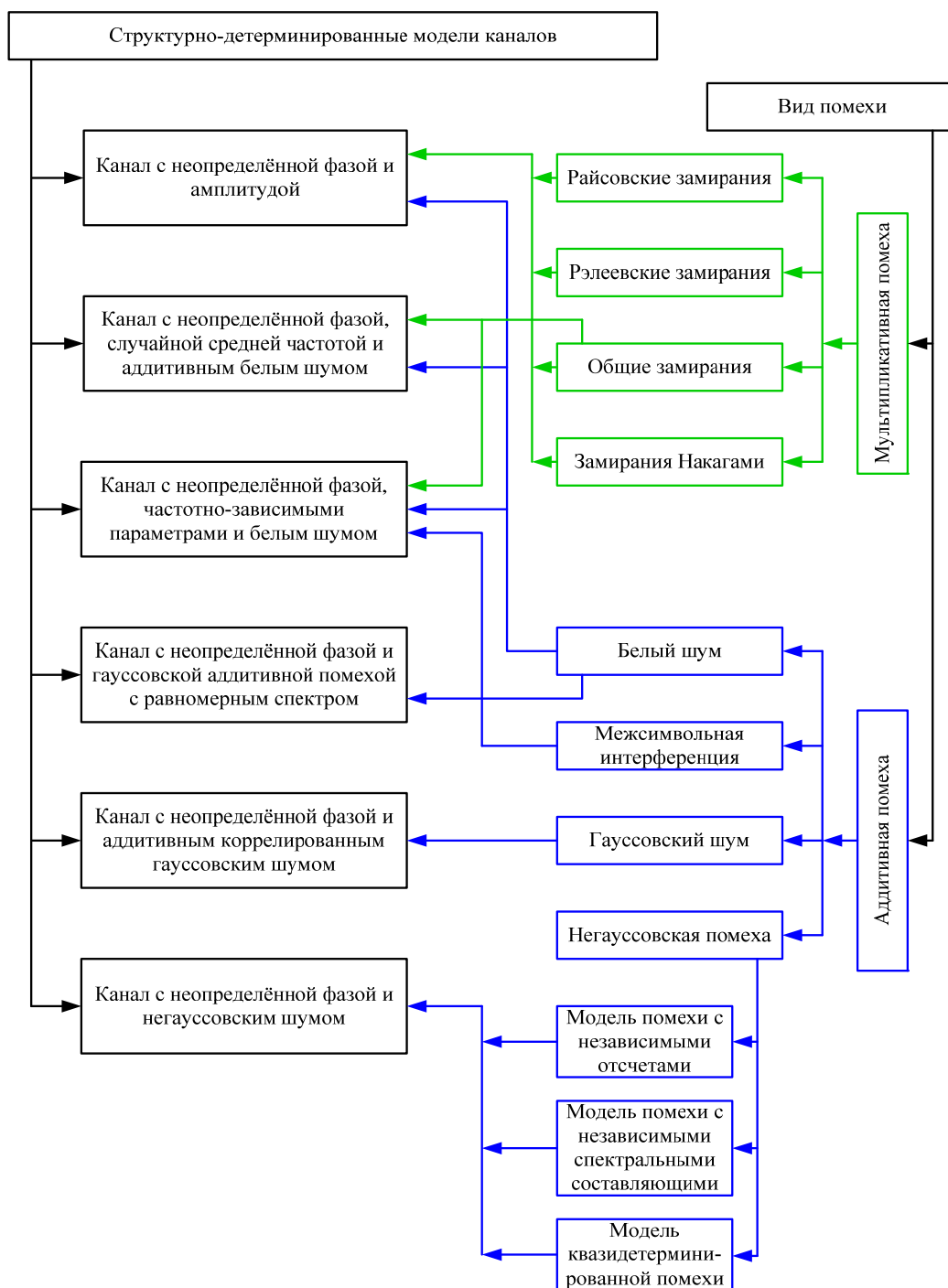


Рисунок 3 – Классификация структурно-детерминированных моделей непрерывных каналов

Математические модели каналов с неопределенной фазой, случайной средней частотой и аддитивным белым шумом и каналов с неопределенной фазой и амплитудой подробно описаны в [2]. Стоит отметить, что математическая модель канала с неопределенной фазой и амплитудой соответствует физической модели канала с общими замираниями.

подавляющее большинство реальных волновых каналов, передающих информацию, являются случайными (стохастическими) [3], т.е. представляют собой среды со случайными неоднородностями. К стохастическим моделям каналов относятся модели каналов, проходя через которые форма сигнала существенно и случайным образом изменяется. В таких каналах рассматривается два вида приема [2]: поэлементный, который по определению предполагает законченное принятие решения о каждом символе на основании отрезка сигнала, на котором передавался этот символ, и прием в целом. В соответствии с этим, стохастические модели каналов (рис. 4) разделяются на:



1) поэлементный прием: гауссовский линейный стохастический канал; канал с дискретной многолучевостью; канал с замираниями, селективными по частоте; канал с замираниями, селективными по времени;

2) прием в целом: канал со случайной фазой; канал с нестабильностью и доплеровским сдвигом частоты; канал с дискретной многолучевостью; канал с селективными замираниями (одиночный и разнесенный прием); канал с разнесенным приемом.

Реальные стохастические каналы связи характеризуются моделями с различной степенью селективности.

Для описания простейшего радиоканала с интерференционными замираниями используется двухлучевая модель канала при флуктуации одного из лучей (наличие прямого и отраженного луча) [4, 5]. Данная модель справедлива на гектометровых волнах в пределах зоны эффективного распространения земной волны (наличие однократно и двукратно отраженных лучей).

Общей моделью радиоканала является многолучевая модель [4, 5]: поле в точке приема представляет собой сумму сигналов с разными амплитудами и случайными фазами. Основными моделями для описания многолучевого канала являются модели каналов со случайной структурой (канал с дискретной многолучевостью, канал с замираниями, селективными по частоте, канал с разнесенным приемом, канал со случайной фазой, канал с селективными замираниями). Модель многолучевого канала достаточно наглядно представлена в виде модели канала с дискретной многолучевостью [2]

$$u(t) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=0}^{N-1} [\mu_{clk} s_{r_k}(t - kT - \tau_l) + \mu_{slk} s_{r_k}(t - kT - \tau_l) + \xi(t)], \quad 0 < t < \infty, \quad (5)$$

где  $\mu_{clk}$ ,  $\mu_{slk}$  – соответственно случайные синфазная и квадратурная составляющие коэффициента передачи в  $l$ -м луче на  $k$ -м элементе;  $l$  – общее число лучей в канале;  $L$  – время запаздывания сигнала в  $l$ -м луче; остальные обозначения такие же, как и в формуле (1).

Данное математическое описание радиоканала является наиболее общим, что позволяет вносить изменения в данную модель в процессе программной реализации радиоканала с многолучевой структурой при различных расположениях рассеивателей в пространстве и может быть использована для исследований ММО-систем.

К частным моделям многолучевого канала относятся каналы с гладкими (общими) замираниями и с частотно-селективными замираниями.

Различают четыре типа многолучевых радиоканалов в соответствии с четырьмя типами замираний в них: каналы с частотно-селективными замираниями (межсимвольная интерференция); каналы с медленными замираниями (гауссовское распределение помехи); быстрые замирания; плоские замирания (закон распределения Рэлея, закон распределения Райса) [6].

Многолучевая модель с медленными замираниями [3] удовлетворительно описывает многие каналы радиосвязи в различных диапазонах волн. Многолучевые модели с селективными во времени замираниями приемлемы для описания некоторых низкоскоростных радиоканалов, используемых для космических линий связи, связи с подвижными объектами.

Многолучевые эффекты в радиоканалах приводят к возникновению рэлеевских замираний, селективных и частотно-зависимых замираний, межсимвольной интерференции из-за задержки сигнала, кроме того, к сигналу добавляется шум канала. Все эти процессы следует учитывать при моделировании реальных каналов связи.

Таким образом, в результате проведенных исследований, состоящих из анализа и обобщения известных результатов математического моделирования каналов радиосвязи, составлена подробная классификация. Отличительной особенностью данной классификации является ее структурированность с учетом разного рода шумов и помех, присутствующих в радиоканале. На основе данной классификации определено место математических моделей, описывающих радиоканал с многолучевой структурой, выбрана общая модель (формула (5)) для дальнейшего использования при описании ММО-технологий.

К основным направлениям дальнейших исследований по данной теме относятся программная реализация имитатора радиоканала на основе данной математической модели, проведение комплекса исследований.

**Литература**

1. *Кловский Д.Д.* Модели непрерывных каналов связи на основе стохастических дифференциальных уравнений / Кловский Д.Д., Конторович В.Я., Широков С.М.; под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
2. *Коржик В.И.* Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: [справочник] / Коржик В.И., Финк Л.М., Щелкунов К.Н.; под ред. Л.М. Финка. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
3. *Кловский Д.Д.* Передача дискретных сообщений по радиоканалам / Кловский Д.Д. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
4. *Немировский А.С.* Борьба с замираниями при передаче аналоговых сигналов / Немировский А.С. – М.: Радио и связь, 1984. – 208 с.
5. *Немировский А.С.* Системы связи и радиорелейные линии / А.С. Немировский, Е.В. Рыжков – М.: Связь, 1980. – 431 с.
6. *Галкин В.А.* Цифровая мобильная радиосвязь: [учебное пособие для вузов] / Галкин В.А. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 432 с.
7. *Теория передачи сигналов: [учебник для вузов] / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, М.В. Назаров, Л.М. Финк. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.*

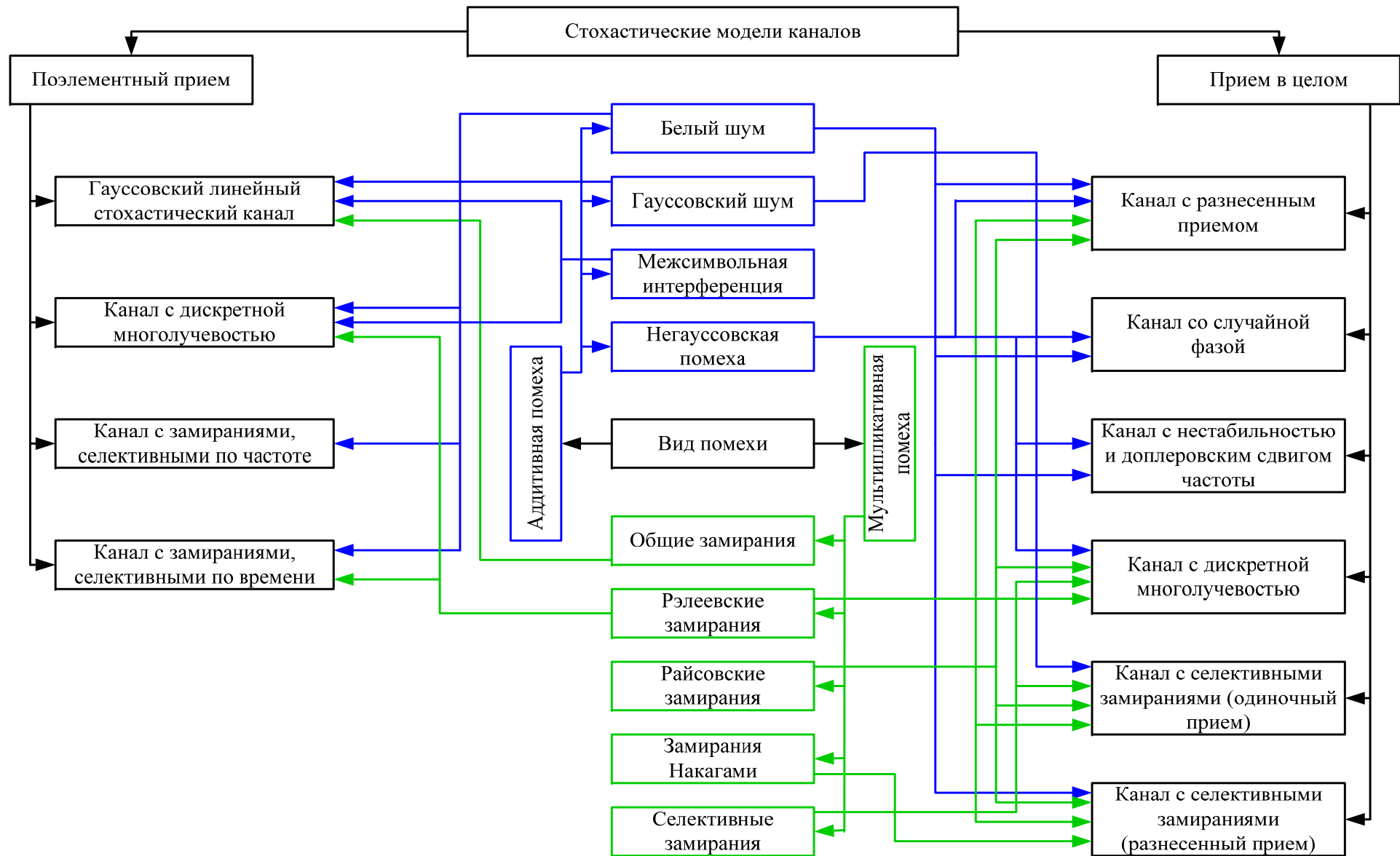


Рисунок 4 – Классификация стохастических моделей непрерывных каналов