

## НЕКОГЕРЕНТНАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ

д.т.н. Выхованец В.С.<sup>1</sup>, студ. Лю Вэнькуй<sup>2</sup>

Институт проблем управления РАН (ИПУ РАН)<sup>1</sup>,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана)<sup>2</sup>

### Введение

Современный период развития средств связи связан с поиском и использованием новых широкополосных шумоподобных сигналов. Одной из актуальных проблем в этой области является синтез больших по мощности ансамблей широкополосных шумоподобных сигналов с хорошими корреляционными и групповыми свойствами. Другая проблема – сложность выделения компонентов из смеси нескольких широкополосных шумоподобных сигналов в условиях шума, а также трудности воспроизведения формы таких сигналов при корреляционном приеме.

В докладе рассмотрен некогерентный корреляционный метод передачи данных, основанный на использовании сигналов, порождаемых на стороне передатчика некоторым генератором шума. Шумовой сигнал разделяется на части (шумовые импульсы) заданной длительности. При передаче текущего шумового импульса следующий шумовой импульс подвергается ортогонализации или коллинеаризации в зависимости от передаваемого бита данных. На стороне приемника вычисляется взаимная энергия текущего и предыдущего шумового импульса. Если эта энергия меньше порога, принимается решение о передаче нуля, в противном случае – о передаче единицы. Синхронизация приемника и передатчика осуществляется изменением знака взаимной энергии соседних шумовых импульсов.

### Ортогонализация шумовых сигналов

Пусть заданы шумовые импульсы длительности  $T$

$$(1) \quad \chi_i(t) \quad (i = \overline{0, N}, t \in [0, T]),$$

полученные от некоторого генератора шума. Определим векторное пространство, в котором заданы операции сложения сигналов, умножения сигнала на константу и скалярное произведение:

$$z = x + y, \quad z(t) = x(t) + y(t) \quad (t \in [0, T]);$$

$$z = \alpha x, \quad z(t) = \alpha \times x(t) \quad (t \in [0, T]);$$

$$(x, y) = \int_0^T x(t) \times y(t) dt,$$

где операции над числами выполняются в некотором конечном или бесконечном поле  $F$ .

Выполним процедуру ортогонализации Грамма-Шмидта сигналов (1):

$$(2) \quad \gamma_i = \chi_i - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{(\chi_i, \chi_j)}{(\chi_j, \chi_j)} \chi_j \quad (i = \overline{0, N}).$$

В итоге получим ортогональные шумовые сигналы (2) такие, что

$$(3) \quad \int_0^T \gamma_i(t) \times \gamma_j(t) dt = \begin{cases} 0, & i \neq j; \\ p_i, & i = j \end{cases} \quad (i, j = \overline{0, N}),$$

где  $p_i$  – энергия сигнала  $\gamma_i$ .

Уравнение (3) позволяет реализовать корреляционный прием и обнаружение шумовых сигналов. Однако для такого приема необходимо иметь копии всех переданных сигналов на стороне приемника, что при использовании реальных шумовых генераторов практически нереализуемо.

### Ортошумовой передатчик

Выходной сигнал передатчика при передаче данных  $\rho_i \in \{-1, 1\}$  ( $i = \overline{1, N}$ ) сформируем в соответствии со следующим рекуррентным уравнением:

$$(4) \quad \begin{cases} \rho_0 = 1; \\ \gamma_0 = 0, \end{cases} \quad \gamma_{i+1} = \chi_i + \rho_i \times \frac{(\gamma_i, \chi_i)}{(\gamma_i, \gamma_i)} \gamma_i \quad (i = \overline{0, N}),$$

где  $\gamma_i$  –  $i$ -ый выходной шумовой импульс передатчика,  $\chi_i$  –  $i$ -ый входной шумовой импульс генератора шума. Взаимная энергия соседних шумовых импульсов будет равна  $(\gamma_{i+1}, \gamma_i)$ ,

$$(5) \quad (\gamma_{i+1}, \gamma_i) = \int_0^T \gamma_{i+1}(t) \times \gamma_i(t) dt = (\chi_i, \gamma_i) + \rho_i \times (\chi_i, \gamma_i).$$

Из (5) следует, что при  $\rho_i = -1$  шумовой импульс  $\gamma_{i+1}$  будет ортогонален шумовому импульсу  $\gamma_i$ , а при  $\rho_i = 1$  – коллинеарен ему, т.е. взаимная энергия импульсов будет или обнуляться или удваиваться.

Структурная схема ортошумового передатчика, реализующего формулы (4), приведена на рис. 1, а одна из реализаций ортошумового сигнала – на рис. 2.

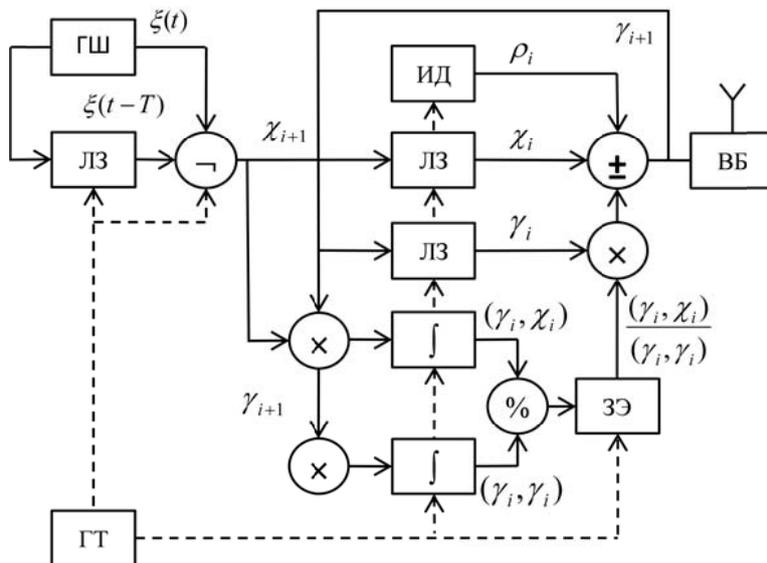


Рис. 1. Ортошумовой передатчик: ГШ – генератор шума, ГТ – генератор тактов, ИД – источник данных, ЛЗ – линия задержки, ЗЭ – запоминающий элемент, ВБ – выходной блок,  $\neg$  – инвертор,  $\pm$  – сумматор-вычитатель,  $\times$  – умножитель,  $\%$  – делитель,  $\int$  – интегратор со сбросом.

На выходе передатчика может использоваться блок нормализации сигнала, который позволяет получить выходной сигнал без заметного изменения мгновенной мощности, вызванной ортогонализацией или коллинеаризацией шумовых импульсов.

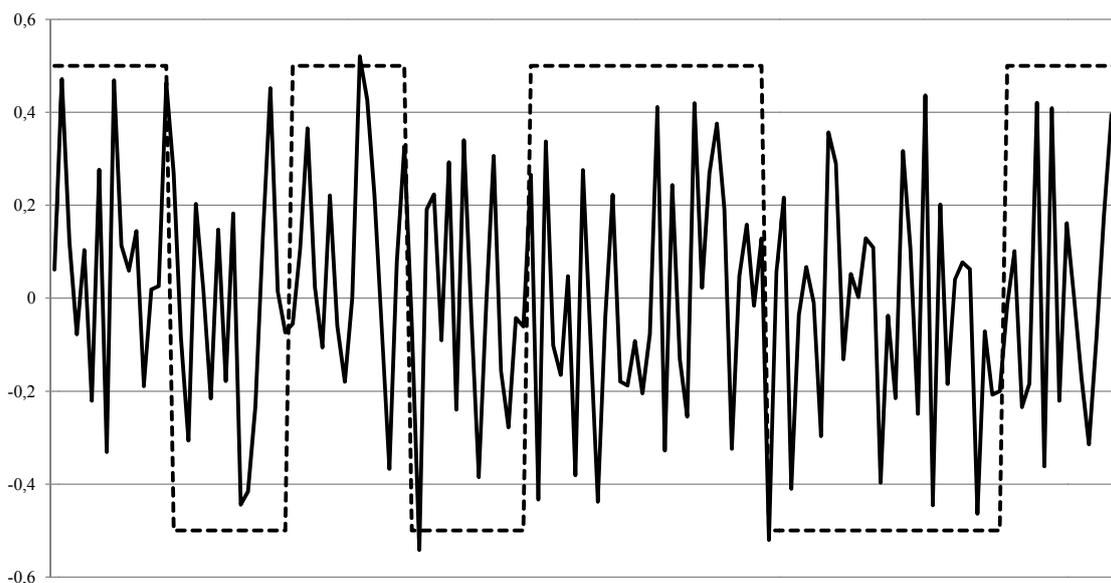


Рис. 2. Ортошумовой сигнал на выходе передатчика при передаче данных 01011001, где первый переданный шумовой импульс – стартовый.

### Передача синхросигнала

Для синхронизации приемника и передатчика используется линия задержки и инвертор  $\neg$  (рис. 1), обеспечивающие изменение знака взаимной энергии соседних шумовых импульсов:

$$\chi(t) = \sigma \times \xi(t) \quad (t \in [0, \infty)),$$

где  $\xi(t)$  – сигнал от генератора шума,  $\sigma$  – инвертирующий множитель,  $\chi(t)$  – синхронизованный шумовой сигнал такой, что взаимная энергия соседних импульсов изменяет свой знак на каждом тактовом интервале (рис. 3):

$$\sigma = \begin{cases} -\tau, & \xi(t) \times \xi(t-T) < 0; \\ +\tau, & \xi(t) \times \xi(t-T) \geq 0, \end{cases} \quad \tau = \begin{cases} -1, & t \in [2nT, (2n+1)T); \\ +1, & t \in [(2n+1)T, 2nT), \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

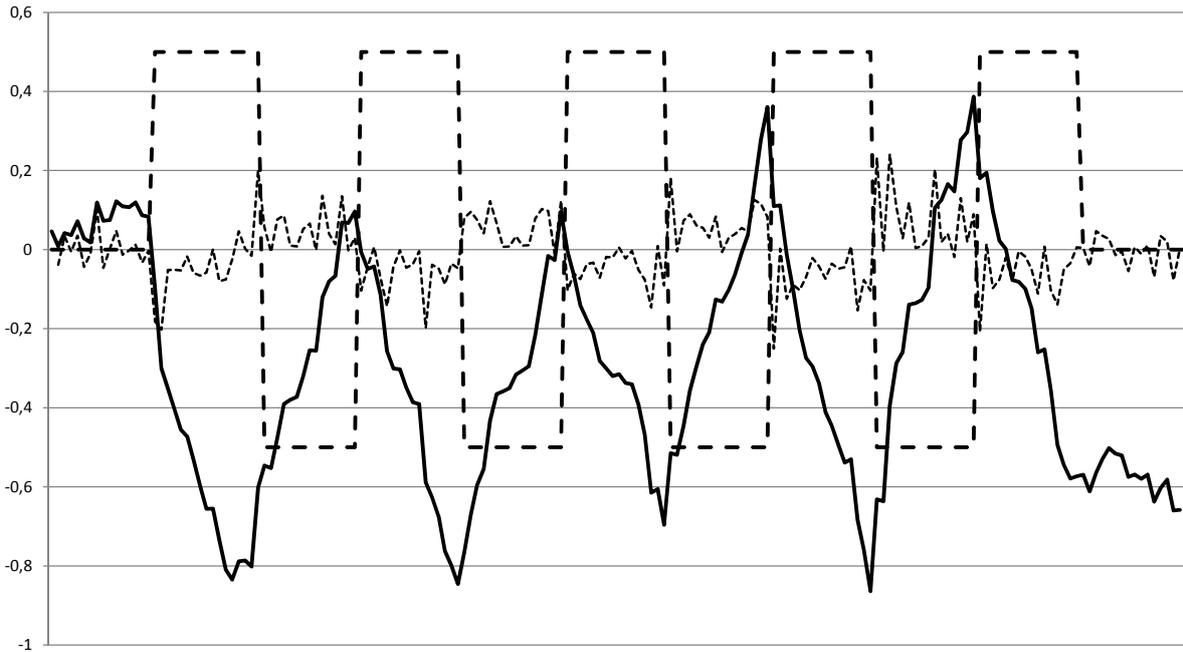


Рис. 3. Интеграл мгновенной взаимной энергии прямого и задержанного шумового сигнала при шуме в канале связи (сплошная кривая), первая производная взаимной энергии (пунктирная кривая), исходный тактовый сигнал (штриховая кривая).

### Ортошумовой приемник

Переданные данные  $\rho_i$  на приемной стороне детектируются так:

$$(6) \quad \rho_i = \begin{cases} -1, & |(\gamma_i, \gamma_{i+1})| < \frac{\varepsilon}{2} \times (\gamma_i, \gamma_i); \\ +1, & |(\gamma_i, \gamma_{i+1})| \geq \frac{\varepsilon}{2} \times (\gamma_i, \gamma_i), \end{cases} \quad t_i: \frac{d}{dt} \left( \int_0^{T+\Delta T} \gamma_i(t) \times \gamma_{i+1}(t) dt \right) = \pm \Delta \quad (i = \overline{1, N}),$$

где  $\gamma_{i+1}$  ( $\gamma_i$ ) – текущий (предыдущий) шумовой импульс,  $t_i$  – момент окончания импульса  $\gamma_i$ ,  $\Delta T$  – максимальная ошибка синхронизации,  $\Delta$  – порог сигнала тактовой синхронизации,  $\varepsilon$  – минимальное значение модуля относительной взаимной энергии соседних шумовых импульсов генератора шума,

$$\varepsilon = \min_{i=0}^N \frac{|(\chi_i, \chi_{i+1})|}{(\chi_i, \chi_i)}.$$

Структурная схема ортошумового приемника, реализующего формулы (6), приведена на рис. 4.

### Заключение

Хорошие корреляционные, спектральные и статистические свойства шумовых сигналов позволят эффективно их использовать в перспективных средствах связи. Результаты экспериментальной проверки помехозащищенности ортошумовой передачи данных показаны на рис. 5. Из графика видно, что при заданном отношении сигнал-шум путем увеличения длительности шумовых импульсов может быть достигнута сколь угодно малая вероятность ошибочного приема одного бита данных.

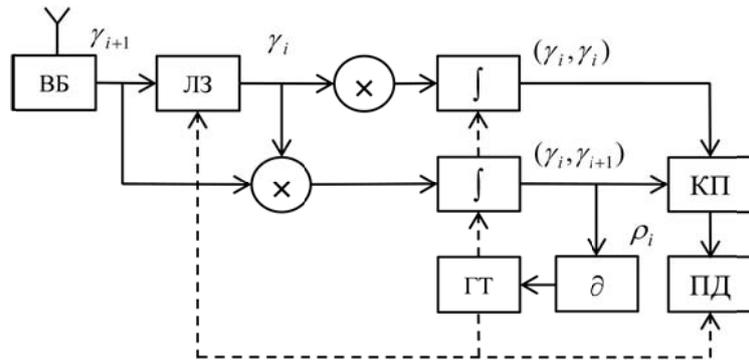


Рис. 4. Ортошумовой приемник: ВБ – входной блок приемника, ЛЗ – линия задержки входного сигнала, ГТ – генератор тактов, КП – компаратор, ПД – получатель данных,  $\times$  – умножитель,  $\int$  – интегратор со сбросом,  $\partial$  – фильтр нижних частот и дифференциатор.

Следует заметить, что используемые в передатчике преобразования исходных шумовых сигналов существенным образом не сказываются на корреляционные, спектральные и статистические характеристики источника шума.

Для увеличения скрытности передачи можно использовать нормализацию передаваемых шумовых импульсов, а также случайное или заранее согласованное изменение длительности шумовых импульсов и фазы сигнала синхронизации. Не видится также препятствий для использования вместо задающего генератора шума генератора хаотического сигнала.

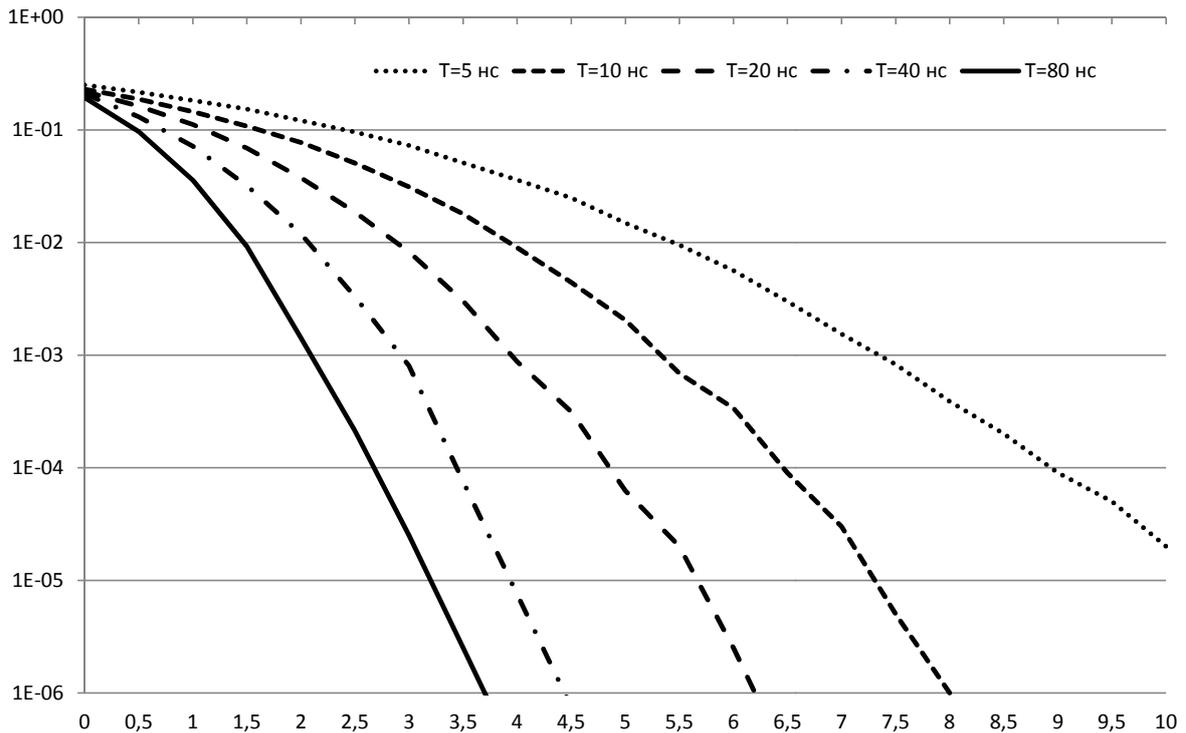


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибочного приема одного бита данных от отношения энергии сигнала к спектральной плотности шума в полосе частот 2,1 ГГц в дБ.