

## Оптимальный многочастотный модем для межмодульного взаимодействия систем гибридных коммуникаций цифрового города

*А.В. Алёшинцев<sup>1</sup>, В.Г. Санников<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Московский государственный строительный университет, Москва*

<sup>2</sup>*Московский технический университет связи и информатики, Москва*

**Аннотация:** Разработка, исследование и построение устройств, позволяющих ускорить процесс взаимодействия между различными модулями (например, Систем телеметрии и телеуправления), а в целом - Систем гибридных коммуникаций цифрового города включающих в себя разнообразные системы, применяемые в Интеллектуальном здании является актуальной проблемой. Одно из таких устройств, представленное в статье – разработанный оптимальный многочастотный модем. Помимо разработанного модема в статье представлены примеры разработок схожих видов устройств и систем, как российских, так и зарубежных исследователей. При этом авторами доказано, что применение предложенного модема обеспечивает выигрыш по спектрально-энергетической эффективности в сравнении с аналогами. Предложенный подход может быть использован для организации высокоскоростной передачи данных по частотно-ограниченным каналам связи на основе новых проводных технологий стандарта цифровой абонентской линии, а также беспроводных систем.

**Ключевые слова:** система телеметрии и телеуправления, интеллектуальное здание, система гибридных коммуникаций цифрового города, модем, многочастотная модуляция, цифровая абонентская линия, оптимальный финитный сигнал, модулятор, демодулятор, беспроводная система связи, оптимальный многочастотный модем, многоканальная связь.

**Введение.** Проблема повышения эффективности модемов с многочастотной модуляцией (МЧМ) связана с отысканием дополнительных средств формирования ортогональных структур обработки сигналов [1]. Оптимальный многочастотный модем ускоряет и цифровизирует процесс взаимодействия между различными модулями коммуникаций цифрового города, помогая создать описанное в [2] единое информационное пространство, позволяющее собирать, систематизировать все полученные данные, на основании которых осуществляется управление на различных этапах жизненного цикла. К примеру, используя данные возведения объекта цифрового города в режиме реального времени, появляется возможность оперативно управлять процессами. Традиционные методы обработки поступающей информации не эффективны для управления её возрастающим

---

количеством, вырабатываемым современными строительными организациями [3]. В работе задача повышения эффективности решается путем перехода от скалярной к векторной обработке сигналов с использованием ортогональных матриц, составленных из поднесущих гармонических колебаний и организации в каждом из каналов трех оптимальных финитных сигналов (ОФС).

**Оптимальный многочастотный модем.** МЧМ-модем преобразуется (используя три попарно ортогональных ОФС:  $y_{1,1}(t) \perp y_{1,2}(t)$ ,  $y_{1,2}(t) \perp y_{1,3}(t)$ ), учитывая их формы и спектры, изображенные на рис.1.

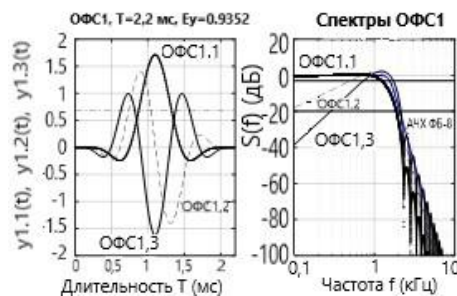


Рис. 1. – Формы и спектры ОФС

Преобразованная структура одного канала цифровой системы передачи (ЦСП) с МЧМ и ОФС представлена на рис. 2. В её основе лежит работа [4].

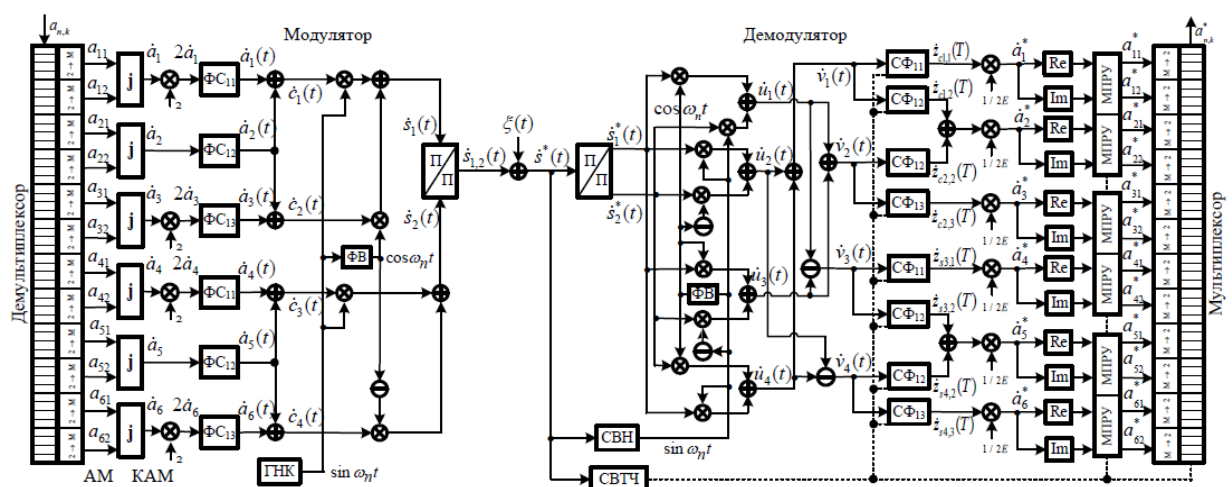


Рис 2. – Структурная схема одного из каналов ЦСП с МЧМ

Здесь  $\Phi C_i$ ,  $i=1,2,3$  – формирователи ОФС  $y_{1,1}(t)$ ,  $y_{1,2}(t)$ ,  $y_{1,3}(t)$  с равными энергиями  $E$  (см. рис. 1), ГНК – генератор поднесущей, ФВ – фазовращатель на  $\pi/2$ ,  $j$ - блок формирования комплексных символов квадратурно амплитудной модуляции (КАМ), СВН – схема восстановления несущей, П/П – параллельно-последовательный преобразователь на передаче и обратный на приеме, СВТЧ – схема восстановления тактовой частоты, СФ $i$ ,  $i=1,2,3$  – согласованные фильтры для ОФС $i$ ,  $i=1,2,3$ , Re и Im – оценщики действительной и мнимых частей комплексных сигналов КАМ, МПРУ – многопороговое решающее устройство. В блоках СВН и СВТЧ реализуется оптимальная синхронизация на основе оценки параметров канала связи.

В модуляторе двоичные данные поступают в демультиплексор (где разбиваются на 12 блоков). Двоичные символы преобразуются в символы двоичной амплитудной модуляции (с  $M=2^m$ ), которые затем преобразуются в символы КАМ. В демодуляторе и модуляторе символы КАМ удваиваются (для повышения энергетической эффективности системы).

Символы КАМ воздействуют на блоки  $\Phi C_i$ ,  $i=1,2,3$ . Поскольку присутствует попарная ортогональность ОФС на выходах сумматоров формируются комбинированные ОФС (КОФС). Далее на конечных во времени интервалах (кратных символьному интервалу), на выходе модулятора формируются параллельно два модулированных КОФС. После параллельно-последовательного преобразования, в канал связи передается комбинированный сигнал.

В демодуляторе  $n$ -ого канала (в режиме отсутствия помех), поэтапно восстанавливаются символы двоичного сообщения. Вначале (наблюдаемый на приеме) сигнал, из последовательной формы преобразуется в блоке П/П в параллельную и восстанавливаются два КОФС с КАМ вида. Далее (если в блоке СВН идеальная синхронизация) на основе ортогональных матричных поднесущих формируются показанные в [1] комплексные вектор-функции.

---

Затем (для восстановления передаваемых низкочастотных КОФС) происходит суммирование и/или вычитание компонент содержащих низкочастотные и высокочастотные (подавляемые далее согласованным фильтром в демодуляторе) составляющие. После этого полученные компоненты, низкочастотные составляющие которых представляют собой суммы попарно ортогональных трёх ОФС, обрабатываются СФ<sub>*i*</sub>, *i*=1,2,3 (с импульсными реакциями). Согласно источнику [5], отклик  $z_{SF}(t)$  согласованного фильтра (на входное воздействие  $v(t)$ ) это свертка входного сигнала с его импульсными реакциями  $q_{SF}(t)$ . На следующем этапе в моменты времени, кратные символному интервалу  $T_s$  (с учетом равенства энергий ОФС<sub>*i*</sub>, *i*=1,2,3) формируются отсчеты.

Символы КАМ (на выходах согласованного фильтра демодулятора) восстанавливаются (с увеличением в 2 раза) и помехоустойчивость демодулятора повышается. В блоках *Re*, *Im* выделяются их действительные и мнимые части. На выходах МПРУ восстанавливаются скалярные символы МАМ, которые затем в блоках  $M \rightarrow 2$  преобразуются в двоичные символы и после их мультиплексирования восстанавливается передаваемое сообщение.

Существуют схожие виды устройств, к примеру:

Демодулятор псевдослучайных сигналов (описан в патенте) с повышенной помехоустойчивостью приёма сигналов в условиях запланированных помех [6], устройство работает следующим образом.

Как указывают авторы, принимаемый сигнал перемножается (на псевдослучайную последовательность). Затем с выхода умножителя сигнал (с которого снята эта последовательность), приходит во вторые умножители. Одновременно с ним поступает запланированная помеха, которая становится случайным процессом (шум канала) связи. На вторые входы фазовых детекторов (на умножитель напрямую), поступает опорный сигнал с генератора поднесущей. В умножитель же поступает через фазовращатель

---

обработанный косинусоидальной и синусоидальной компоненты сигнала. Протектированные посылки сигнала (проходящие через интеграторы), представляют из себя, фильтры нижних частот. Существуют и другие модемы, например, модем, который описан в [7] полезной моделью к патенту РФ. Он содержит такие элементы, как: 1. Кодер; 2. Модулятор; 3. Генератор; 4. Цифроаналоговый преобразователь; 5. Аналогоцифровой преобразователь; 6. Эхокомпенсатор; 7. Корректор; 8. Демодулятор с фильтром; 9. Декодер; 10. Система синхронизации. Недостаток модема - его сложность. Существует и другой способ с устройством реализации, который описан в работе [8]. Обеспечивает: 1. Подстраиваемое понижение скорости (в зависимости от сигнально-помеховой обстановки). 2. При условии множественных помех он переходит на увеличение мощности сигнала и сигнально-кодую конструкцию с исправлением ошибок. 3. Избирательность (по соседнему каналу), с помощью полосовых фильтров. 4. Подстраиваемое перераспределение потока перезапросов (используя процедуры, систем передачи данных с решающей обратной связью) и обнаружение с индикацией применения средств радиоэлектронной борьбы.

В иностранных источниках модемы (например, такая часть как демодулятор) также описаны, в [9] он содержит: блок обнаружения, который обнаруживает наличие или отсутствие входного сигнала модуляции, на основании анализа изменения выходного напряжения в зависимости от входного сигнала детектора. Блок обнаружения включает в себя блок фильтра, для удаления высокочастотной составляющей с выхода детектора. Блок обнаружения с квадратурным детектором имеет блок усиления сигнала, блок преобразования частоты и блок источника тока. Блок усиления сигнала усиливает первый сигнал модуляции модулированного исходного сигнала сигналом несущей частоты; блок преобразователя частоты осуществляет преобразование модулированного в исходный сигнал.

---

Электронное устройство, оснащённое детектором прямоугольных импульсов с блоком источника тока, который подаёт ток на устройство усиления сигнала.

**Многочастотная модуляция.** Технологии цифровой абонентской линии (ЦАЛ) используются для передачи высокоскоростных данных по проводам витой пары [10]. Текущие стандарты ЦАЛ могут включать асимметричный ЦАЛ с высокой скоростью передачи данных и цифровую сеть интегрированных сервисов. Эти технологии могут использовать передачу в основной полосе частот в сочетании с обычной телефонной службой. Сигналы ЦАЛ могут занимать более высокие полосы частот, в то время как телефонные сигналы могут передаваться в полосах частот ниже 4 килогерц (кГц). Сигналы ЦАЛ и телефонной службы могут быть разделены и соединены через разветвитель с соответствующим приемником и сетью соответственно.

### **Выводы**

В системах цифровой абонентской линии может быть реализована дискретная многочастотная модуляция. Оптимальный многочастотный модем позволяет ускорить процесс взаимодействия между различными модулями (например, Систем телеметрии и телеуправления Интеллектуального здания), и, в целом, Систем гибридных коммуникаций цифрового города.

### **Литература**

1. Алёшинцев А.В., Санников В.Г. Метод повышения спектральной эффективности когерентного модема с многочастотной модуляцией // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 1. С. 15-20.

2. Чернявский И. А., Ларин Н. С. Цифровизация процессов на всех этапах жизненного цикла объекта капитального строительства //



Инженерный вестник Дона. 2023. № 4. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8354

3. Крюков К.М., Шаповалов А.В. Использование технологии цифровых двойников в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2022. №5 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7640.

4. Санников В.Г., Алёшинцев А.В. Метод повышения спектрально-энергетической эффективности когерентного МЧМ модема с оптимальными финитными сигналами КАМ // Наука в современном информационном обществе: XXVII Международная научно-практическая конференция, North Charleston/ НИЦ «Академический». Morrisville: LuluPress, Inc. 2021. С. 82-88.

5. Аджемов А.С., Санников В.Г. Общая теория связи. М.: Горячая линия – Телеком. 2018. 624 с.

6. Биккенин Р. Р., Елисеев В.Н., Мазепа В.А., Хворов С.Д. Демодулятор псевдослучайных сигналов с относительной фазовой модуляцией// Патент на изобретение № 2625529 С2 Российская Федерация, Заявка № 2014137064 от 12.09.2014. Опубликовано: 14.07.2017; заявитель Открытое Акционерное Общество "Научно-исследовательский институт автоматизированных систем и комплексов связи "Нептун". 15 с. URL: fips.ru/wps/PA\_FipsPub/res/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/625/529/ИЗ-02625529-00001/DOCUMENT.PDF

7. Костылев В. А., Комаров В. Д., Соппа М. В., Белопольский И. В., Комаров П. В. Модем// Полезная модель к патенту № 71198 U1 Российская Федерация, Заявка № 2007131952/22 от 23.08.2007; Опубликовано: 27.02.2008 заявитель Закрытое акционерное общество "Научно-производственная фирма "Сигма". 20 с. URL: patents/doc/RU71198U1\_20080227

8. Кейстович А. В. Способ и устройство для адаптивной радиосвязи// Патент на изобретение № 2626335 С1 Российская Федерация,

---



Заявка № 2016135154 от 29.08.2016. Опубликовано: 26.07.2017; заявитель Акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Полет". 13 с. URL: [patents/doc/RU2626335C1\\_20170726](https://patents/doc/RU2626335C1_20170726)

9. Kentaro Yasunaka, Takashi Masuda, Katsunao Ito, Yoshifumi Miyajima. Squared detector, demodulator, detection method, and electronic device.

№ WO2017183478A1 26.10.2017. 41p. URL: [patents.google.com/patent/JP2017195571A/en](https://patents.google.com/patent/JP2017195571A/en)

10. Cao Shi, Amir H. Fazlollahi, Jianhua Liu. Aligning the Upstream DMT Symbols of Multiple Lines in a TDD DSL System. № US20160191230A1 30.06.2016. 21p. URL: [patents.patnap.com/v/US10148415-aligning-the-upstream-dmt-symbols-of-multiple-lines-in-a-tdd-dsl-system.html](https://patents.patnap.com/v/US10148415-aligning-the-upstream-dmt-symbols-of-multiple-lines-in-a-tdd-dsl-system.html)

### References

1. Aleshintsev A.V., Sannikov V.G. Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov. 2018. T. 9. № 1. pp. 15-20.

2. Chernyavsky I.A., Larin N.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8354](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8354).

3. Kryukov K.M., Shapovalov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022. №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7640](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7640).

4. Sannikov V.G., Aleshintsev A.V. Nauka v sovremennom informatsionnom obshchestve: XXVII Mezhdunarodnaya nauchno prakticheskaya konferentsiya, North Charleston. NITs «Akademicheskij». Morrisville: LuluPress, Inc. 2021. pp. 82-88.

5. Adzhemov A.S., Sannikov V.G. Obshchaya teoriya svyazi [General theory of communication]. M.: Goryachaya liniya Telekom. 2018. 624 p.

6. Bikkenin R. R., Eliseev V.N., Mazepa V.A., Khvorov S.D. Demodulyator psevdosluchaynykh signalov s otnositel'noy fazovoy modulyatsiey [Demodulator of pseudorandom signals with relative phase modulation]. Patent na izobretenie № 2625529 C2 Rossiyskaya Federatsiya, Zayavka № 2014137064 ot

---



12.09.2014. Опубликовано: 14.07.2017; заявитель Otkrytoe Aktsionernoe Obshchestvo "Nauchno-issledovatel'skiy institut avtomatizirovannykh sistem i kompleksov svyazi "Neptun". 15 p. URL: [fips.ru/wps/PA\\_FipsPub/res/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/625/529/ИЗ-02625529-00001/DOCUMENT.PDF](https://fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/625/529/ИЗ-02625529-00001/DOCUMENT.PDF)

7. Kostylev V. A., Komarov V. D., Soppa M. V., Belopol'skiy I. V., Komarov P. V. Modem [Modem]. Poleznaya model' k patentu № 71198 U1 Rossiyskaya Federatsiya, Zayavka № 2007131952/22 ot 23.08.2007; Опубликовано: 27.02.2008 заявитель Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo "Nauchno-proizvodstvennaya firma "Sigma". 20 p. URL: [patents/doc/RU71198U1\\_20080227](https://patents/doc/RU71198U1_20080227)

8. Keystovich A. V. Sposob i ustroystvo dlya adaptivnoy radiosvyazi [Method and device for adaptive radio communication]. Patent na izobretenie № 2626335 C1 Rossiyskaya Federatsiya, Zayavka № 2016135154 ot 29.08.2016. Опубликовано: 26.07.2017; заявитель Aktsionernoe obshchestvo "Nauchno proizvodstvennoe predpriyatie "Polet". 13 p. URL: [patents/doc/RU2626335C1\\_20170726](https://patents/doc/RU2626335C1_20170726)

9. Kentaro Yasunaka, Takashi Masuda, Katsunao Ito, Yoshifumi Miyajima. [Squared detector, demodulator, detection method, and electronic device]. № WO2017183478A1 26.10.2017. 41p. URL: [patents.google.com/patent/JP2017195571A/en](https://patents.google.com/patent/JP2017195571A/en)

10. Cao Shi, Amir H. Fazlollahi, Jianhua Liu. [Aligning the Upstream DMT Symbols of Multiple Lines in a TDD DSL System]. № US20160191230A1 30.06.2016. 21p. URL: [patents.patnap.com/v/US10148415-aligning-the-upstream-dmt-symbols-of-multiple-lines-in-a-tdd-dsl-system.html](https://patents.patnap.com/v/US10148415-aligning-the-upstream-dmt-symbols-of-multiple-lines-in-a-tdd-dsl-system.html)

**Дата поступления: 10.10.2024**

**Дата публикации: 17.11.2024**