

СОВМЕСТНЫЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ И ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ДЛЯ КЛАССА МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С НЕПРЕРЫВНОЙ ФАЗОЙ

В.В. Шахгильдян, президент МТУСИ, д.т.н., член-корреспондент РАН

О.В. Колычев, аспирант МТУСИ

Развитие современных систем и устройств радиотехники и связи, техники управления, радиолокации и навигации, радио- и информационно-измерительных комплексов невозможно без широкого применения систем синхронизации.

В статье приведен краткий обзор совместных систем фазовой и тактовой синхронизации (СФ и ГС) для класса модулированных сигналов с непрерывной фазой (МНФ), нашедшего в последние годы широкое применение в различных областях связи. Указаны некоторые вопросы, возникающие при использовании таких систем синхронизации.

Синхронизация и сигналы МНФ. Круг задач, решаемых системами синхронизации, весьма обширен: слежение за несущими и поднесущими частотами принимаемых сигналов, когерентная демодуляция аналоговых и цифровых сигналов с частотной и фазовой модуляцией, синхронизация и демодуляция двоичных символов цифровой информации, синтез сетки высокостабильных частот, стабилизация частот генераторов различных диапазонов.

Переход к цифровым методам передачи аналоговых сообщений вызвал в последние годы значительный рост объемов передачи дискретной информации по каналам связи и появление новых образцов аппаратуры передачи данных. Увеличение спроса на цифровые каналы передачи привело к исследованиям, направленным на максимально эффективное использование полосы частот, уменьшение внеполосных излучений, повышение помехоустойчивости и энергетической эффективности [1].

Интенсивность проводимых исследований в этой области в последние годы заметно повысилась, что, конечно, связано с совершенствованием элементной базы микроэлектроники и ростом рабочих частот. Переход на новые технологии существенно расширил возможности систем синхронизации и повысил эффективность устройств на их основе. Появилась возможность создавать варианты систем, обладающих требуемыми характеристиками по точности и надежности работы, быстродействию, помехоустойчивости для различных типов входных сигналов и законов модуляции. Стало реальностью создание гибких алгоритмов обработки информации, оптимизации параметров и характеристик.

Однако четкая работа систем синхронизации, а также практическая реализация таких алгоритмов возможна с помощью оптимальных и квазиоптимальных методов приема. И хотя в последнее время этому вопросу уделяется повышенное внимание, вопрос о синхронизации и об оптимальном сочетании этих параметров пока исследован недостаточно.

Значительные резервы совершенствования систем передачи дискретной информации заключены в применении

МНФ, эффективно использующих полосу частот. По мере того как «стоимость» полосы частот (естественного ресурса) становится выше, увеличивается и важность использования таких сигналов. Однако с появлением МНФ возникли новые вопросы в области синхронизации, особенно символической в многолучевых каналах связи. Ведь эффективность применения полосы частот здесь достигается за счет сглаживания фазового импульса сигнала во временной области. Такое сглаживание приводит к концентрации энергии сигнала в узкой полосе, что обеспечивает уменьшение ширины полосы, требуемой для передачи сигнала, и размещение соседних сигналов плотнее друг к другу, практически без взаимных помех. В то же время, вследствие сглаживания сигнала во временной области, проявляется тенденция к «размыванию» символьных переходов, а это нарушает четкую работу систем синхронизации.

Большое число степеней свободы сигналов МНФ предоставляет разработчику аппаратуры связи широкие возможности по управлению параметрами сигнала, спектральными и энергетическими показателями, расширяет в конечном счете область применения. В последние годы у крупнейших производителей телекоммуникационного оборудования наблюдается тенденция использования в передающей аппаратуре сигналов МНФ. Они нашли широкое применение в мобильной спутниковой и наземной связи (например, стандарт GSM), а также в транкинговой связи (ARCO-25, EBAC8) [2,3]. Поэтому вопрос их приема и синхронизации становится особенно актуальным.

Для анализа помехоустойчивости алгоритмов приема сигналов МНФ, основанного на определении вероятности ошибки применяется метод, базирующийся на вычислении евклидова расстояния между сигналами. Однако, так как для нахождения помехоустойчивости данный метод использует характеристики, заложенные именно в саму систему сигналов, то он применим только к оптимальным и квазиоптимальным приемникам с идеальными генератором опорного сигнала и устройствами фазовой и тактовой синхронизации. Такие приемники обладают всей необходимой информацией о сигнале: начальная фаза, несущая частота и влияние канала на сигнал. Реально в приемнике информация о сигнале всегда будет известна с некоторыми погрешностями, да и сами устройства приемника не идеальны. Синхронизация в технике связи — это фундаментальная проблема, равноценная и равнозначная обнаружению и выделению сигнала. Решение вопросов учета влияния погрешности синхронизации и приводит к необходимости модернизации метода. Процесс синхронизации до сих пор остается одним из самых сложных при работе с данным классом сигналов.

Системы синхронизации используют принципы замкнутой либо незамкнутой, совместной либо раздельной (автономной или каскадной) оценки состояния синхронизации. В сопоставимых условиях совместные оценки заведомо не хуже, а обычно гораздо лучше по точности, чем раздельные. В классе совместных систем синхронизации предпочтительнее двухфункциональная структура, рационально совмещающая операции как оценивания состояния синхронизации, так и различения сигнала информации. Все это объясняет повышенное внимание к этому классу систем синхронизации.

Наиболее привлекательна стратегия синхронизации исключительно по информационным символам (совмещенный канал — СК, англ. Non-Data Aided — NDA), когда можно избежать применения специально выделенных сигнала и канала синхронизации — как это делается при использовании DA (выделенный канал — ВК, англ. Data Aided — DA) синхронизации. Важным преимуществом NDA-метода является достаточная простота входного процессора и способность достигнуть быстрого и надежного приема для всех типов сигналов МНФ.

Примеры совместных СФ и ТС для сигналов модуляции с минимальным частотным сдвигом (ММС, англ. MSK). В обзорных работах [4–13] получены сравнительно простые структуры совместных СФ и ТС. Некоторые виды и типы автономных синхронизаторов изложены в [14].

Это взаимосвязанные СФ и ТС замкнутой структуры, в которых вопросы нелинейного анализа стохастической системы и динамики остаются открытыми. Структура допускает известные обобщения. Например, в [14] рассмотрена

замкнутая структура фазового синхронизатора — случай сигнала обобщенной модуляции с минимальным сдвигом (ОММС, англ. GenMSK) с использованием решающей обратной связи. Но и там вопросы точности синхронизации не решены.

Максимально правдоподобный фазовый и тактовый синхронизатор [4] для сигнала ММС показан на рис. 1.

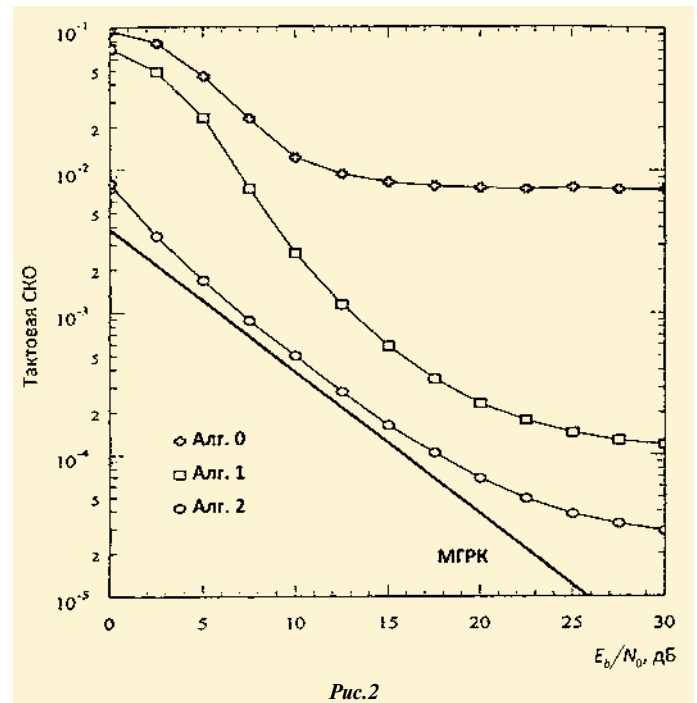


Рис.2

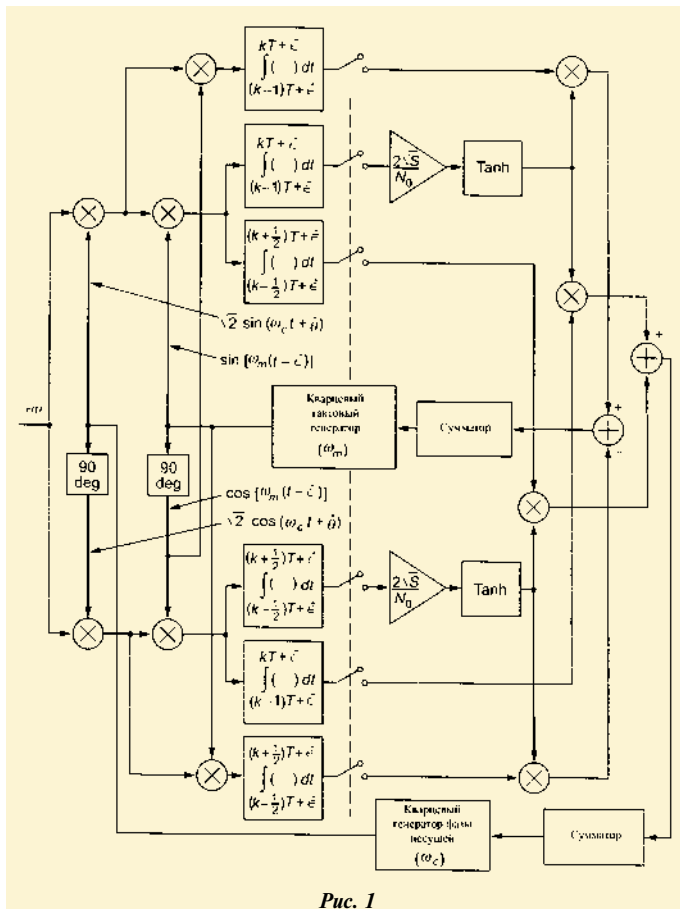


Рис. 1

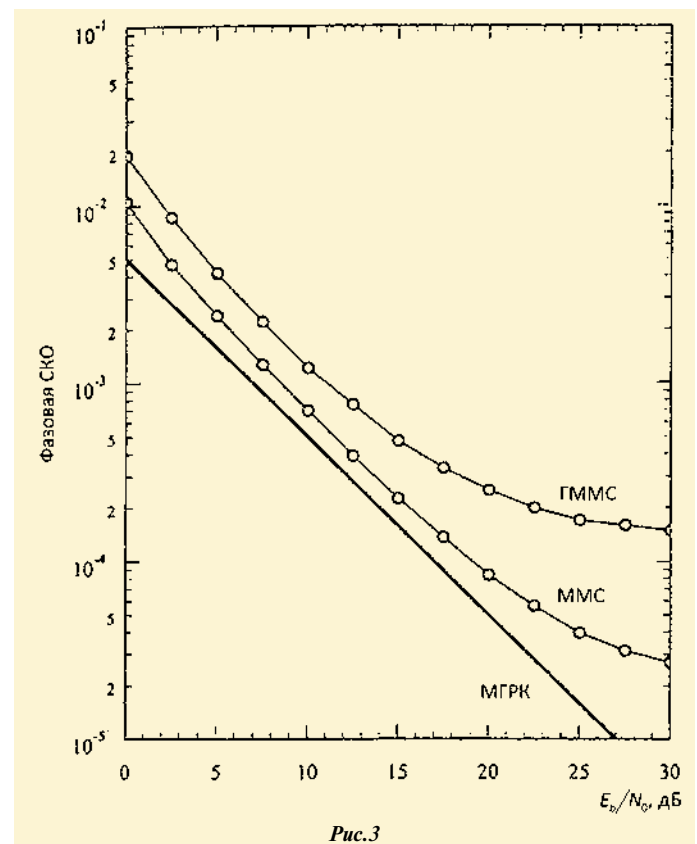


Рис.3

Незамкнутая совместная СФ и ТС для сигнала ОММС приведена в [5].

На рис. 2 продемонстрирована точность тактовой синхронизации (СКО, англ. MSE — среднеквадратическая ошибка) при сигнале ММС и отмечена модифицированная граница Рао-Крамера (МГРК). Наглядно видны потери точности ранее известных алгоритмов 0 и 1. Рис. 3 показывает точность фазовой синхронизации: ГММС (GMSK) — гауссовская модуляция с минимальным частотным сдвигом. Предложенный в [5] алгоритм 2 достаточно громоздок и поэтому в статье опущен.

В [6–13] исследуется максимум правдоподобия (МП, англ. ML) синхронизации модема двоичных сигналов цифровой МНФ. Здесь проблема сложности решается путем той или иной аппроксимации вычислителя статистик с последующим упрощением процессора Витерби. В [10] приведена структура приемника и фазового синхронизатора модема сигнала МНФ. Использование аппроксимации сигнала МНФ сигналами линейной модуляции позволяет достигнуть простой реализации приемника.

На рис. 4 показана [11] структура приемника совместных фазового и тактового синхронизаторов модема сигнала МНФ. Здесь ГУО (англ. NCO) — генератор, управляющий отсчетами.

В [11] описано построение и применение автономного (т. е. не связанного ни с символьным детектором, ни с фазовым синхронизатором) тактового синхронизатора с пороговым обнаружением ложного захвата. Его назначение — обнаружить и парировать ложный захват, разладку

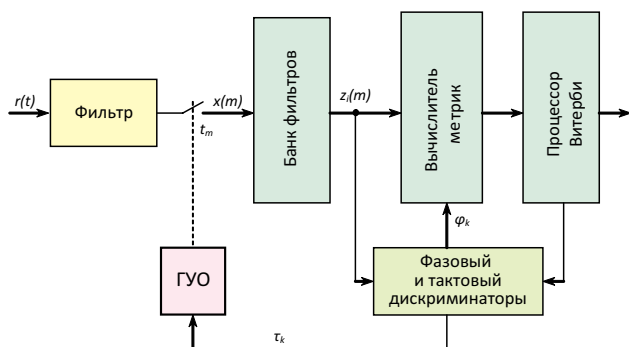


Рис. 4

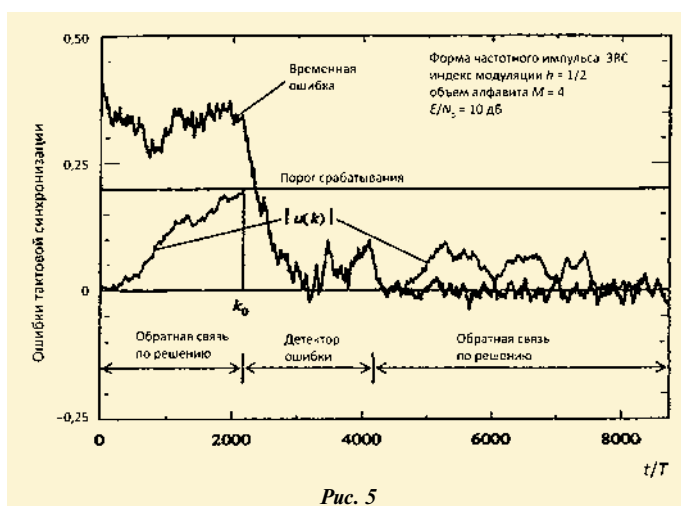


Рис. 5

синхронизации, поскольку самостоятельное применение неоправданно из-за неприемлемо низкой точности синхронизации в режиме приема информации. Рис. 5. иллюстрирует процесс обнаружения и устранения ложного захвата разладки синхронизации (для сигнала 4хЗПКМНФ — МНФ с частотным импульсом длиной 3Т формы приподнятого косинуса при $M = 4$).

Таким образом, проведенное сравнение показывает, что класс совместных систем выигрывает по показателю точности синхронизации. Это объясняет повышенное внимание именно к этому классу систем синхронизации. Вопросы нелинейного анализа стохастической динамики совместных систем фазовой и тактовой синхронизации остаются открытыми, представляя широкую область для интенсивных исследований. Можно ожидать, что появление нового класса сигналов МНФ стимулирует поиск перспективных видов и типов систем синхронизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Biglieri E. Digital transmission in 21st century: conflating modulation and coding. // IEEE Comm. Mag. — 2002. — Vol. 40. — № 5. — P. 128–137.
2. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2006. — 288 с.
3. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. — М.: Горячая линия, 2007. — 432 с.
4. Booth R. An illustration of the MAP estimation for deriving close-loop phase tracking topologies: the MSK signal structure // IEEE Tr. Commun. — 1980. — Vol. COM-28. — № 8. — P. 1137–1142.
5. Morelli M., Vitella G.M. Joint phase and timing recovery for MSK-type signals // IEEE Tr. Commun. — 2000. — Vol. 48. — № 12. — P. 1997–1999.
6. Premji A.-N., Taylov D.P. Receiver structures for multi-h signaling formats // IEEE Tr. Commun. — 1987. — Vol. COM-35. — № 4. — P. 439–451.
7. Premji A.-N., Taylov D.P. A practical receiver structure for multi-h CPM signals // IEEE Tr. Commun. — 1987. — Vol. COM-35. — № 9. — P. 901–908.
8. Huber J., Liu W.L. An alternative approach to reduced-complexity CPM-receivers // J. Select. Areas Commun. — 1989. — Vol. SAC-7. — № 9. — P. 1437–1449.
9. Huber J., Liu W.L. Data-aided synchronization on coherent CPM-receivers // IEEE Tr. Commun. — 1992. — Vol. 40. — № 1. — P. 178–189.
10. Colavolpe G., Raheli R. Reduced-complexity detection and phase synchronization of CPM signals // IEEE Tr. Commun. — 1997. — Vol. 45. — № 9. — P. 1070–1079.
11. Morelli M., Mengali U., Vitella G.M. Joint phase and timing recovery with CPM signals // IEEE Tr. Commun. — 1997. — Vol. 45. — № 7. — P. 867–876.
12. Tang W., Shwedyk E. A quasi-optimum receiver for continuous phase modulation // IEEE Tr. Commun. — 2000. — Vol. 48. — № 7. — P. 1087–1090.
13. Tang W., Shwedyk E. ML estimation of symbol timing and carrier phase for CPM in Walsh signal space // IEEE Tr. Commun. — 2001. — Vol. 49. — № 6. — P. 969–974.
14. Mengali U., D'Andrea A.N. Synchronization technique for digital receivers. — N.Y., Plenum press, 1997. — 520 p.

Получено 12.12.07