

УДК 621.398

© Кукушкин С. С.

ДВУМЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ КАК ОСНОВА РЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Рассматриваются методические основы нового подхода к реформированию и развитию систем передачи информации на основе разработки и внедрения двумерных, в том числе квадратурных технологий модуляции сигналов. Обоснована перспектива их развития в качестве основы экономного использования частотного диапазона каналов связи и повышения эффективности передачи информации в существующих и модернизируемых информационно-измерительных комплексах.

«Где мы находимся?» - спрашивают путешественники, летящие на воздушном шаре низко над Землей, у прохожего. Им отвечают: «На воздушном шаре!». «Это был ученый!» - говорит один из путешественников. «С чего ты взял?» - спрашивает второй. «Его ответ был точным, но совершенно бесполезным» - замечает первый.

(Притча)

Без науки человечество жить не может. И с этим тезисом никто не спорит. Проблема заключена в том, как повысить эффективность самого научного труда. Особенно она актуальна для России.

Всем понятно, что из наших зарубежных друзей никто и никогда деньги для подъема промышленности, а тем более в укрепление обороноспособности России вкладывать не будет. Из той ямы, в которой мы оказались, необходимо выбираться самостоятельно. На что можно при этом опереться? Вывод однозначный – естественно на изобретательность.

Прежний престиж России как государства, достигшего значительных успехов в науке и технике, в настоящее время скорее мираж, чем реальность. Для возврата прежнего величия, хотя бы в тех пределах, которые были ранее достигнуты, необходимо много и плодотворно работать.

Однако к такой коренной перестройке ума и настроений прикладная наука не готова по целому ряду причин. Известный статистический закон Ципфа-Мандельброта, успешно применяемый при решении задач социологии и экономики, в приложении к науке можно интерпретировать следующим образом: к возможности получения фундаментальных результатов

при проведении научных исследований готовы не более 1 – 5% ученых. Остальные 95–99% ученых на это не способны. Справедливость закона подкреплена значительным объемом накопленного статистического материала. Однако из этого вовсе не следует, что оставшиеся 95–99% ученых не нужны. Они создают необходимую научную базу, обеспечивающую работу наиболее одаренных. К такому выводу также можно прийти и на основании соответствующей интерпретации закона Ципфа-Мандельброта.

Если обратиться к статистике, представленной Ципфом-Мандельбротом, и учесть, что 1–5% отечественных ученых либо уже давно за границей, либо находятся в преклонном возрасте, то вывод относительно перспективы нашей науки неутешительный. Напрашивается извечный для России вопрос: «Что делать?».

Прежде всего, необходимо отметить, что распределения Ципфа-Мандельброта – это статистический закон, который определяет тенденцию, используемую для прогноза. Выход из создавшегося положения следует искать в расширении творческих возможностей оставшихся ученых, которые в соответствии с законом Ципфа-Мандельброта относятся к числу «неперспективных» в части новых научных открытий.

Известна определяющая роль математики как королевы науки в расширении творческих возможностей человека. Известно множество исторических примеров того, как учащиеся, сами того не подозревая, делали открытия. Один из них имеет непосредственное отношение к теме статьи.

На экзамене у знаменитого английского радиофизика – изобретателя вакуумного диода – А.Флеминга

Кукушкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник 4 ЦНИИ МО РФ.

один из студентов должен был рассказать о радиотелефонии, которая в те времена осуществлялась только посредством амплитудной модуляции (АМ). Он чувствовал себя весьма неуверенно, поскольку из того, что рассказывал на лекции Флеминг, он запомнил, что передаваемый АМ-сигнал может быть представлен в виде:

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где $A(t)$ – огибающая сигнала; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – его круговая частота (f_0 – частота); φ_0 – его начальная фаза.

Отличие этого сигнала от чисто гармонического $A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ ничтожное (в одном случае A – величина постоянная, в другом – $A(t)$). Однако спектры их различны. Но в то время научного направления, посвященного изучению спектров сигналов, не было. Оно было неактуальным, так как до этого телефонная связь была проводной. В этом случае (при частоте амплитудной манипуляции, не превышающей нескольких десятков герц (Гц), требуемая полоса пропускания была значительно уже, чем полосы пропускания передатчиков и приемников. При модуляции одним тоном с частотой $\Omega < \omega_0$ переменную амплитуду можно представить в следующем виде:

$$A(t) \neq A(1 + m \cos \Omega t).$$

Историческая заслуга студента заключалась в том, что он разложил, пользуясь знаниями школьной тригонометрии, выражение для $s(t)$ на следующие три чисто гармонические составляющие:

$$\begin{aligned} s(t) &= A(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t + \varphi_0 = \\ &= A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{m}{2} A \cos[\omega_0 + \Omega t + \varphi_0] + \\ &+ \frac{m}{2} A \cos[\omega_0 - \Omega t + \varphi_0]. \end{aligned} \quad (2)$$

В результате получалось, что помимо основной излучаемой в эфир частоты радиоволны в спектре частот присутствуют так называемые «боковые частоты»: $(\omega_0 + \Omega)$ и $(\omega_0 - \Omega)$. При интерпретации полученного результата получалось, что радиосигнал состоит не из одного несущего колебания, а еще содержит два дополнительных синусоидальных колебания, которые впоследствии назовут «*боковыми полосами*». Каждое из них имеет частоту, немного отличную от ω_0 . Флеминг не мог согласиться с данным выводом, поскольку считал, что возможности радиоэфира в части его уплотнения системами радиосвязи практически исчерпаемы. А из того математического представления, которое представил студент, следовало, что станции не будут влиять друг на друга только тогда, когда их несущие достаточно разнесены. Величина этого разнесения должна быть такой,

чтобы боковые полосы не перекрывались между собой.

Однако оценку «удовлетворительно» студент все же получил. Этот пример заставил многих ученых задуматься над следующей философской проблемой: «Действительно ли математика объективно отражает наблюдаемый нами мир?» Более двадцати лет она составляла основу спора многих выдающихся ученых радиопрофизиков.

А. Флеминг и его единомышленники полагали, что преобразование (2) является одним из многих возможных представлений. А это, по их мнению, исключало однозначность физической их трактовки. Например, в качестве контраргумента рассматривалось разложение $\cos(\omega t)$ в виде следующей суммы:

$$\cos(\omega t) = M(t) + N(t), \quad (3)$$

где $M(t) = \begin{cases} 1 + 4t/T, & t \leq 0 \\ 1 - 4t/T, & t > 0 \end{cases}$ – пилообразная функция с

периодом $T = 2\pi/\omega$;

$N(t) = \cos \cos(\omega t) - M(t)$ – дополнение пилообразной функции до синусоидальной.

Этот результат приводился в качестве подтверждения факта «нефизичности» интерпретации математических преобразований. Его смысл состоял в «нефизичности» утверждения о том, что в косинусоиде реально присутствует треугольная функция $M(t)$. Возникал естественный вопрос о предпочтении, заключающемся в оценке достоверности физической интерпретации.

Математические преобразования всегда «физичны» в случае применения строгих математических доказательств. Исторический пример со студентом и профессором А. Флемингом необходим для того, чтобы подчеркнуть, что математика является средством усиления возможностей человека и настолько мощным, что студент может «поправить» профессора.

Но и здесь также есть проблемы, которые только подтверждают силу закона Ципфа-Мандельброта. Основные из них прекрасно обозначил замечательный польский математик Г.Штейнгауз: «...В математике несравненно явственней, чем в других дисциплинах, ощущается, насколько растянуто шествие всего человечества. Среди наших современников есть люди, чьи познания в математике относятся к эпохе более древней, чем египетские пирамиды, и они составляют значительное большинство. Математические познания незначительной части людей дошли до эпохи средних веков, а уровня математики XVIII века не достигает и один человек на тысячу... Но расстояние между теми, кто идет в авангарде, и необозримой массой путников все возрастает,

процессия все более растягивается и идущие впереди отдалаются все более и более». Особенно тревожной эта тенденция является для современной России, поскольку фундаментальная наука не может себя защитить из-за малочисленности, а «необозримая масса путников» в это время занимает командные высоты и давит все новое, поскольку это «новое» она не может понять.

К основной теме статьи приведенное лирико-историческое вступление имеет следующее отношение. В 1999 году США были обеспокоены успехами, которые были достигнуты в РФ в области идентификации телеметрической информации (ТМИ), предоставляемой в соответствии с Договором о СНВ-1. В качестве контрмер профессором К.Фехером была предложена новая технология повышения эффективности передачи данных и ограничения доступа к смысловому содержанию ТМИ на основе комплексной (частотной (FQPSK) и амплитудной (QAM-16 MODIFIED)) многопозиционной квадратурной модуляции. При этом одна и вторая составляющие комплексной квадратурной модуляции быстро модернизируются и внедряются для передачи ТМИ.

Новые технологии передачи связаны с двумерным представлением данных на основе квадратурной и синфазной составляющих сигнала. При таком подходе появляется возможность распараллеливания приема и обработки принимаемых сигналов (рис.1,2).

В более обобщенном представлении можно утверждать, что перспектива развития методов представления данных и модуляции сигналов связана с двумерным и многомерным представлением данных.

Важное обстоятельство для последующего понимания сути новых технологий, в том числе и патентов К.Фехера, состоит в том, что разрывы фазы и изменения частоты на границах символов в условиях, когда их производные не равны, сопровождается расширением спектра формируемого сигнала. Поэтому все новые технологии модуляции основаны на том, чтобы смена символов совпадала с вершинами синусоид и косинусоид (рис. 3). В этом случае обеспечивается равенство нулю производных от гармонического колебания и уменьшаются требования к полосе пропускания канала связи.

Поэтому при разработке и реализации новых квадратурных технологий необходимо, например, чтобы фаза на интервалах $0 - \pi/2$ и $\pi/2 - 0$ менялась бы не линейно, а по синусоиде, наложенной на нее. В этом случае разрывы фазы при использовании МЧМ закругляются, в результате чего значительно уменьшаются требования к полосе пропускания радиоканала. В результате

обеспечивается значительное повышение плотности передаваемых данных (информации) в радиоканалах.

Квадратурные технологии – краткая история и направления развития

К числу новых научных направлений решения проблем связи и передачи информации, которые активно развиваются в последнее время, следует отнести многомерное представление передаваемых данных на уровне видео- и радиосигналов. Условно к первому классу можно отнести: данные, представленные образцами-остатками [1], ко второму – сигналы с многомерной и квадратурной модуляцией [2,3]. Цель разработки новых методов и технологий заключена в том, чтобы спектр передаваемых сигналов был как можно уже.

Первое направление, в котором РФ безусловный лидер, достаточно хорошо изучено и реализовано. Второе направление в плане перспектив развития систем связи и передачи информации также хорошо было исследовано, но не реализовано.

Изначально квадратурная технология представления данных с целью повышения помехоустойчивости выделения полезных составляющих сигнала применялась при обработке принятых импульсных сигналов. В 70-х – 80-х годах прошлого века на ее применение было получено множество изобретений. В списке литературы приведена незначительная их часть [4-14]. Под квадратурными технологиями в начале понималось представление в виде синхронизирующей последовательности копий передаваемого или принятого сигнала, сдвинутых относительно друг друга на полтакта (полимпульса) [3]. Затем в определенный момент пришло понимание, что эффективность такого представления может быть существенно повышена, если копии не будут на сигнальном уровне в точности повторять друг друга. Основу для формирования двумерной модуляции составили различные виды логического представления двоичных кодов на уровне видеосигналов (рис.6). При этом по одному из законов изменения уровней видеокода модулируется, например, частота, а на основании другого закона – фаза (рис. 6)[2].

Настоящий переворот в открытии новых резервов для повышения эффективности передачи информации был произведен с момента появления конструктивной теории конечных полей [1], когда активно стали внедряться нетрадиционные представления данных образцами-остатками. Новая технология открывала

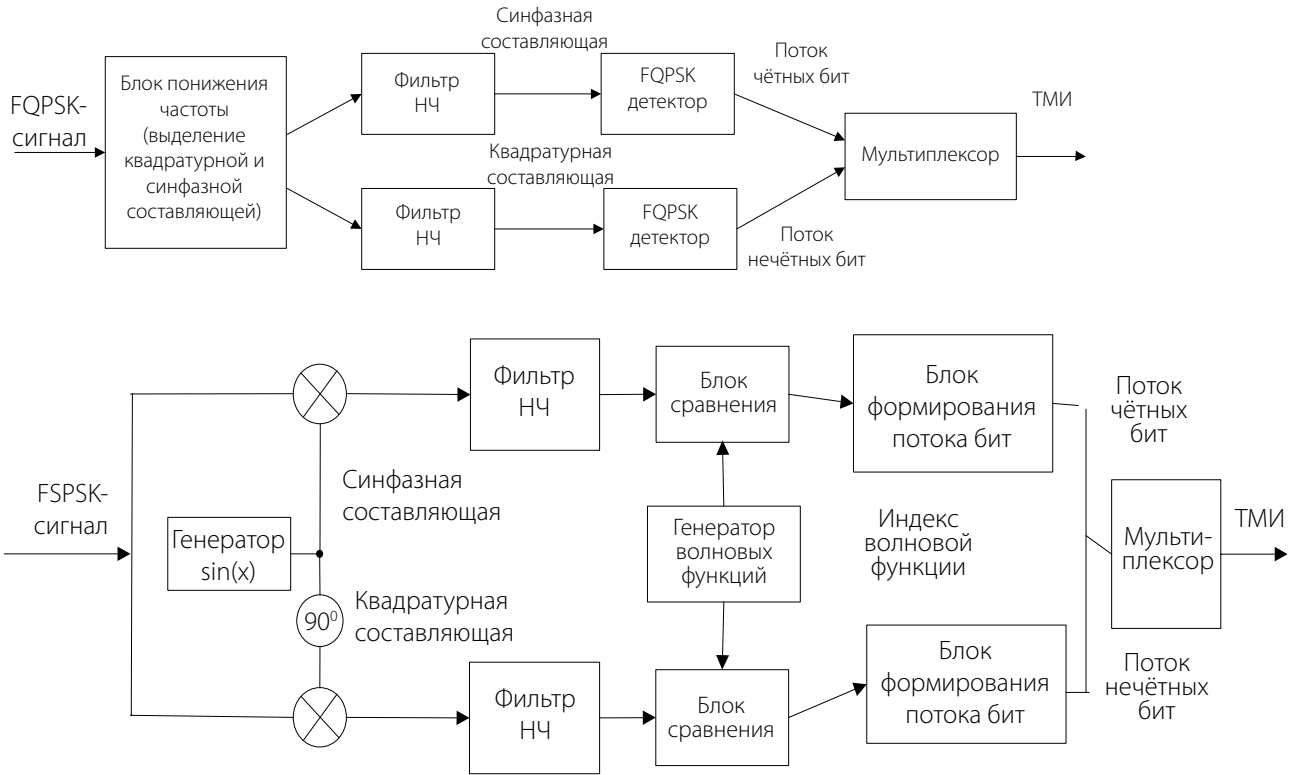


Рис. 1. Синтезированные схемы FQPSK-демоделяции при приеме телеметрической информации

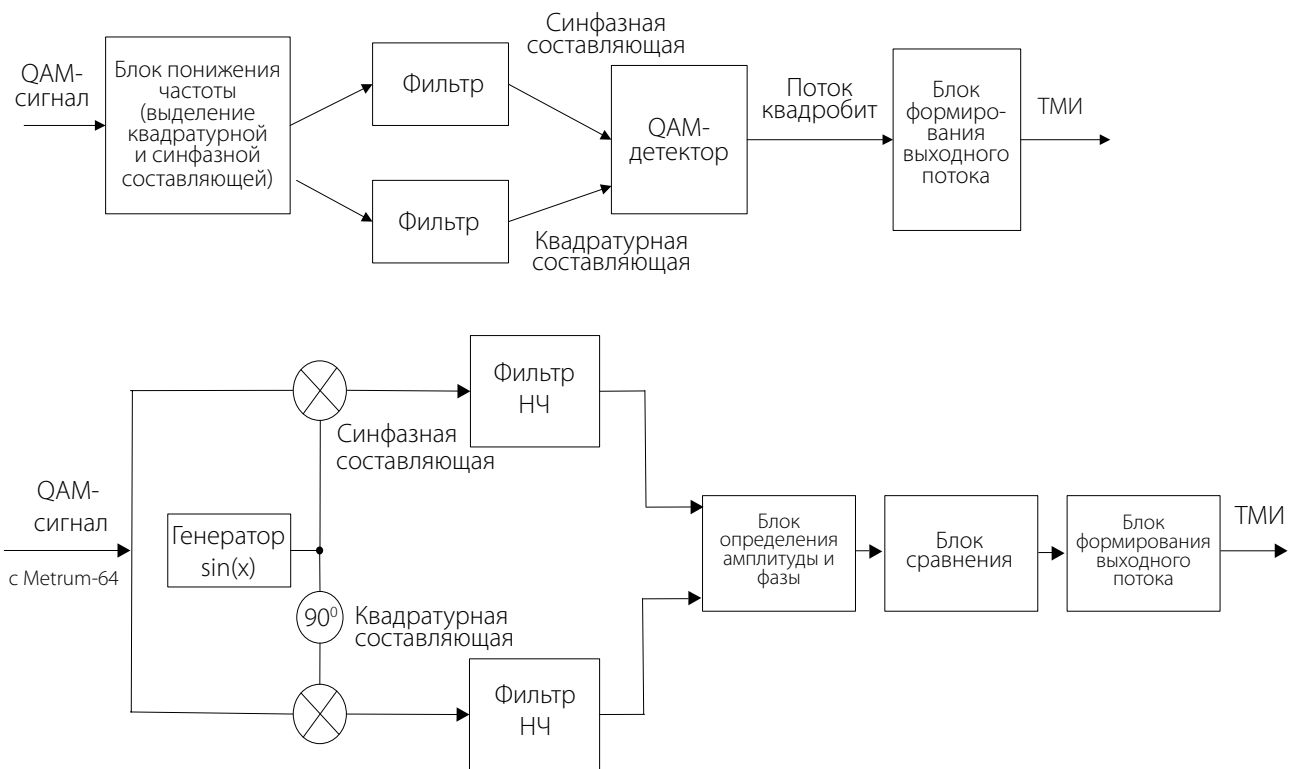


Рис. 2. Укрупненная и подробная схема QAM-16 демодуляции

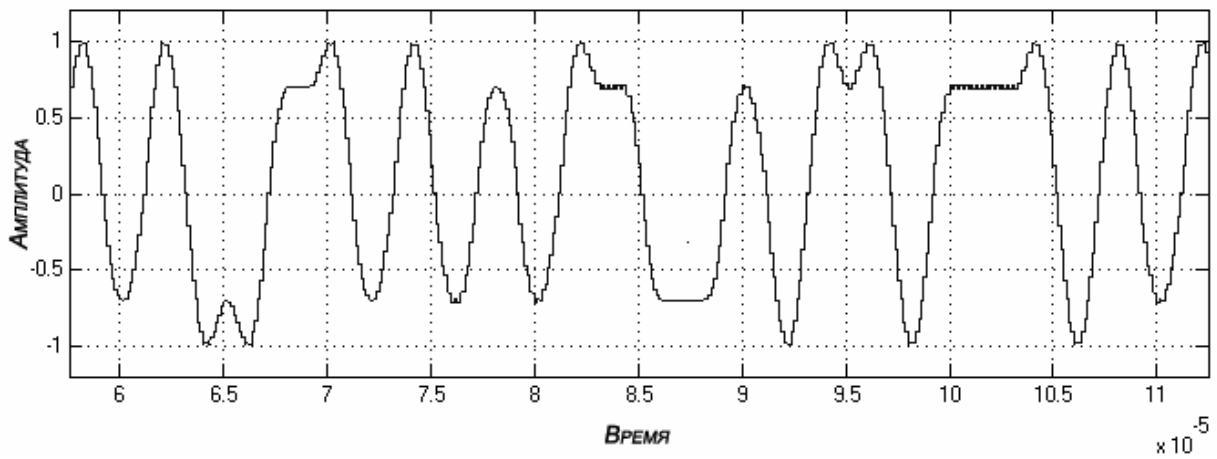


Рис. 3. Квадратурная (синфазная) составляющая сигнала FQPSK

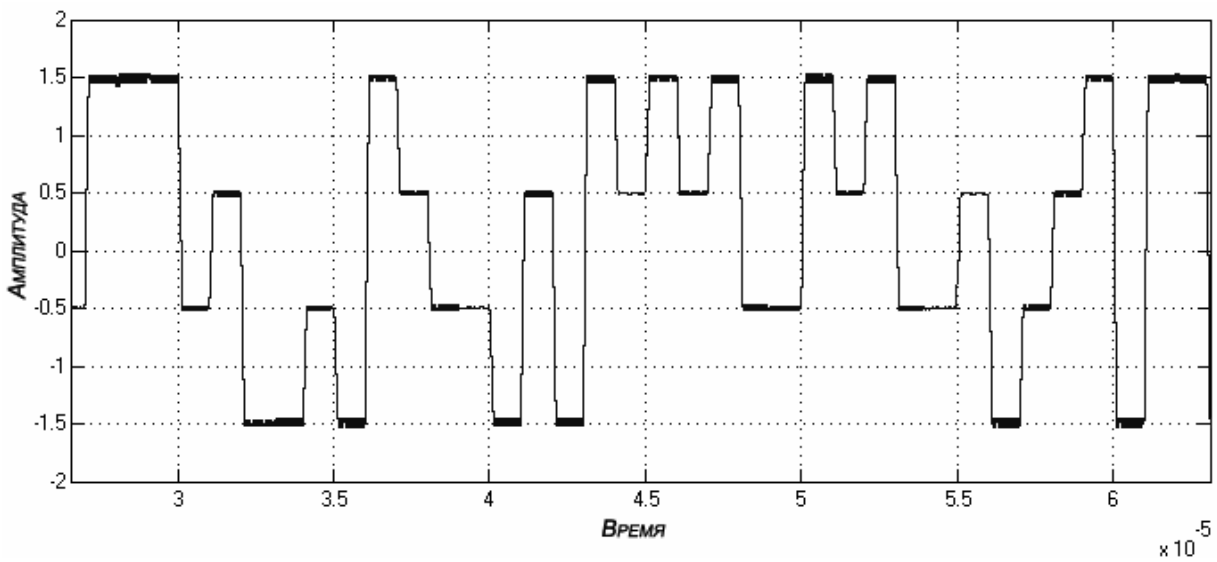


Рис. 4. Квадратурная (синфазная) составляющая сигнала QAM-16.

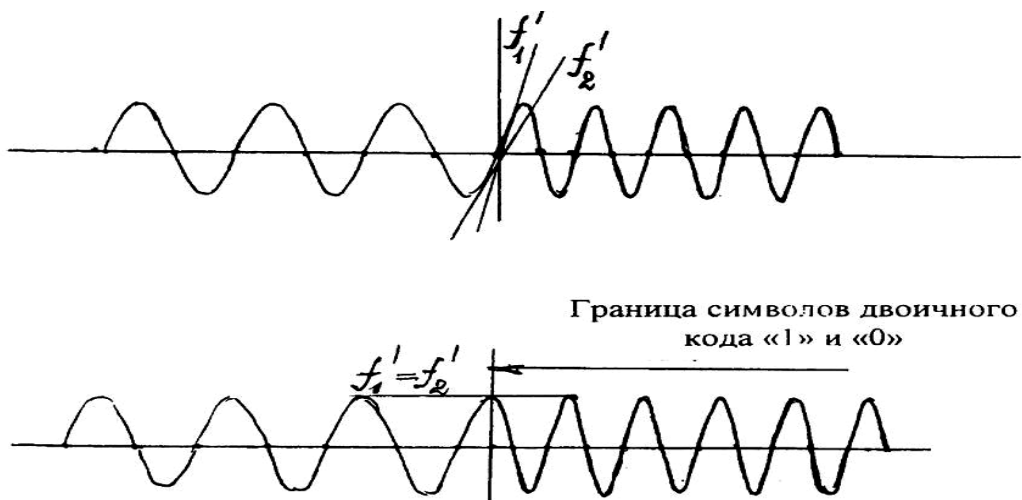
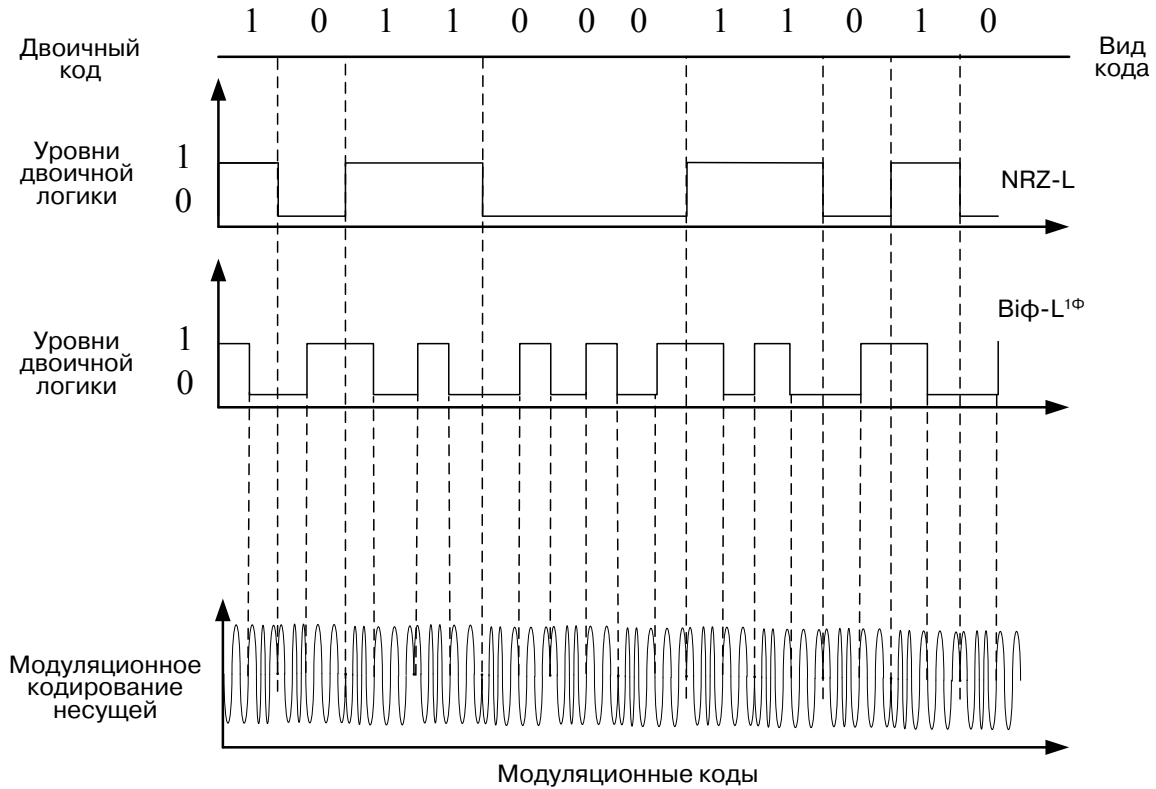


Рис. 5. Иллюстрация метода уменьшения внеполосных излучений на основе оптимального объединения несущих колебаний при частотной манипуляции на границах символов двоичного кода



Передаваемые двоичные символы и различные способы их представления на уровне видеосигналов

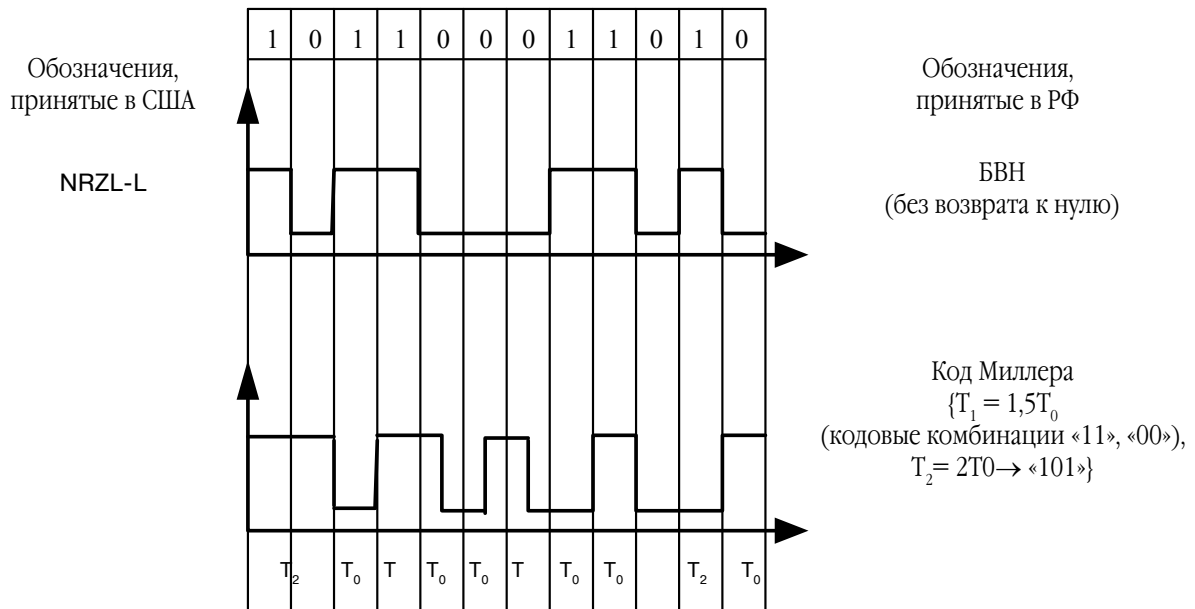


Рис. 6. Иллюстрации двумерного модуляционного кодирования несущей радиосигнала

широкие возможности для синтеза нетрадиционных представлений передаваемых данных, при котором формируемые копии сигналов (на сигнальном уровне, а не на содержательном) не повторяли бы друг друга. Эта

особенность (неповторяемость) была связана с выбором модулей сравнения, в качестве которых используются модули-числа и модули-полиномы [1].

С момента открытия эффекта «боковых полос»

пришло понимание того факта, что радиоэфир – это бог-ом данный ресурс. Следовательно, к его расходованию необходимо относиться бережно. На реализацию этой плодотворной идеи направлены квадратурные технологии в широком современном их понимании. Они предполагают многомерное представление данных и сигналов, как совокупность приемов, приводящих к эффекту значительной экономии полосы пропускания радиоканала. Поэтому область применения квадратурных технологий стала быстро расширяться. Появились квадратурные методы модуляции сигналов. В большом количестве и многообразиях предлагаемых реализаций новые идеи были рождены в СССР, а затем и в РФ. Однако в большинстве своем они не были реализованы на практике. Исключение составляет только нетрадиционное представление данных образцами-остатками, которое впервые было реализовано в отечественной бортовой адаптивной телеметрической системе «Крона». Она успешно прошла в 1998 году летные испытания на МБР, показала возможность достижения значительного комплексного положительного эффекта.

Были еще изобретения [11,12], у которых в качестве замещающих структурно-кодовых конструкций использовалось представление передаваемых данных не в двоичном коде, а в замещающем коде с основанием 3.

Научную основу такого подхода составлял факт, известный из теории чисел: троичная система счисления является в 1,33 раза более экономичной по сравнению с двоичной. Но двоичная система счисления была проще и на определенных порах это положение определяло ее предпочтительность в использовании. Предполагалось, что троичная система счисления при представлении данных будет использована только при передаче информации. Это позволило бы в 1,33 раза уменьшить требуемую полосу пропускания радиоканала, способствовало бы повышению избирательности и, как следствие, помехоустойчивости приема.

Подобные системы появились в США в 90-х годах, представление данных телеизмерений образцами (но не образцами-остатками) начало широко внедряться в США после 2000 года.

Разработка и внедрение новых технологий способствовали повышению конкурентной борьбы за достижение новых результатов в области повышения эффективности информационно-телеметрического обеспечения испытаний и штатной эксплуатации ракетно-космической техники. Возможности традиционного экстенсивного подхода оказались практически исчерпанными, поэтому активизируется борьба за использование новых технологий.

Литература

1. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика: В 2т. – т.1: Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках. – М.: МО РФ, 2003. – 284с.
2. Кукушкин С.С., Мороз А.П. Патент №2115172, 1995.
3. Аношкин А.В. Патент №2158759, 2002.
4. Кукушкин С.С. Устройство для выделения импульсных сигналов, АС № 720823, 1980.
5. Кукушкин С.С. Устройство для выделения сигналов на фоне помех, АС № 756649, 1980.
6. Кукушкин С.С., Мовчан Л.В. Устройство для выделения импульсных сигналов, АС № 824068, 1981.
7. Кукушкин С.С. Устройство для передачи информации по радиолиниям, АС № 849509, 1981.
8. Кукушкин С.С. Устройство для приема и контроля достоверности телеметрической информации, АС № 851444, 1981.
9. Кукушкин С.С. Устройство для выделения сигналов на фоне помех, АС № 884107, 1981.
10. Кукушкин С.С. Устройство для выделения сигналов на фоне помех, АС № 895265, 1982.
11. Кукушкин С.С. Устройство передачи и приема телеметрической информации, АС № 923299, 1982.
12. Кукушкин С.С. Устройство передачи и приема телеметрической информации, АС № 934842, 1982.
13. Кукушкин С.С., Колесников В.П. Способ и устройство для контроля достоверности ТМИ с неизвестной структурой сигнала, АС №1300530, 1987.
14. Кукушкин С.С., Колесников В.П. Способ и устройство для контроля достоверности ТМИ с неизвестной структурой сигнала, АС №1300530, 1987.

Материал поступил в редакцию 21. 12. 2007г.