

Применение сигнально-кодовой конструкции с дополнительной квадратурной модуляцией при передаче информации по космическим радиопередающим линиям

С. В. Штанько, В. А. Крягин

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
vka@mil.ru

Аннотация. В статье анализируется возможность применения сигнально-кодовой конструкции с дополнительной квадратурной модуляцией для передачи любого рода информации по космическим радиопередающим линиям. Рассмотрен выбор индекса дополнительной модуляции, при котором возможна передача дополнительного сигнала ниже уровня шумов.

Ключевые слова: комплексная огибающая; ПСП; квадратурная модуляция; расширяющая последовательность; элементарный символ

I. ВВЕДЕНИЕ

Жизнь современного общества нельзя представить без широкого использования космических систем передачи информации (КС ПИ), предоставляющих огромный спектр услуг в области навигации, телекоммуникации и наблюдения за околоземным пространством и поверхностью Земли, являющихся стратегическим средством обеспечения национальной безопасности страны.

С каждым годом космические системы активно развиваются во всем мире. Востребованность и спрос на КС ПИ также активно растет. Эти системы используются для организации связи с удаленными территориями, для резервирования наземных каналов связи и многочисленных корпоративных и частных сетей передачи информации. Возможность охватывать обширные территории используется для организации ТВ и радиовещания, как для прямого (непосредственного) ТВ и радиовещания, так и доставка теле- и радиопрограмм. Так же КС ПИ широко применяются, в случаях, когда необходимо быстро развернуть канал передачи информации.

Однако такая популярность КС ПИ наталкивается на ряд ограничений. В связи с этим, методы повышения эффективности использования частотного ресурса существующих космических систем являются актуальными. Чтобы удовлетворить спрос на использование КС ПИ, разрабатываются различные способы повышения эффективности использования частотного ресурса.

В современных КС ПИ широкое распространение получили сигналы с расширенным спектром. Такие сигналы обладают рядом преимуществ по сравнению с системами без расширения спектра: повышенной помехоустойчивостью, возможностью обеспечения многостанционного (множественного) доступа на основе кодового разделения каналов связи, высокой энергетической скрытностью [1].

Методы расширения спектра могут базироваться на модуляции любого параметра сигнала: амплитуды, фазы, частоты сигнала в соответствии со специальным кодом, формируемым на основе псевдослучайной последовательности (ПСП). Одним из эффективных и распространённых методов расширения спектра является метод непосредственной модуляции несущей ПСП.

II. ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНО-КОВОЙ КОНСТРУКЦИИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ КВАДРАТУРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Под сигнально-кодовой конструкцией с дополнительной квадратурной модуляцией понимается сигнал, состоящий из двух, не зависящих друг от друга, потоков информации (основного $S_{осч}$ и дополнительного $S_{доп}$), передающихся в составе комплексной огибающей единого сигнала (рис. 1).

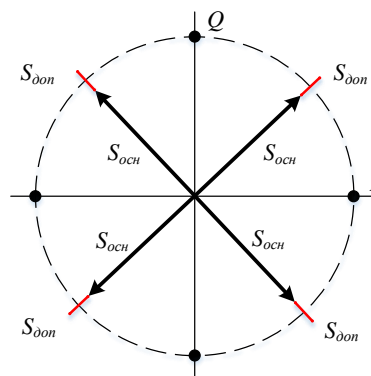


Рис. 1. Квадратурная диаграмма основного и дополнительного сигналов

Аналитическая запись такого радиосигнала имеет вид

$$S_{\Sigma}(t) = Ah_{осн}(t)e^{i(\omega_0 t + \varphi(t))} + A\mathcal{G}h_{доп}(t)e^{i(\omega_0 t + \theta(t))} = A(h_{осн}(t)e^{i\varphi(t)} + \mathcal{G}h_{доп}(t)e^{i\theta(t)})e^{i(\omega_0 t)}$$

где $h_{осн}(t)$, $h_{доп}(t)$ – расширяющие последовательности, принимающие значения ± 1 и учитывающие наложение информационных сообщений в основном и дополнительном сигналах; A – амплитуда радиосигнала; ω_0 – несущая частота; $\varphi(t)$, $\theta(t)$ – начальные фазы основного и дополнительного сигналов; \mathcal{G} – индекс дополнительной модуляции.

При формировании дополнительного сигнала будем применять расширение спектра на основе метода непосредственной модуляции несущей ПСП при условии, что длительность символа расширяющей последовательности дополнительного сигнала (чипа) должна быть кратной и не больше длительности передаваемого символа основного сигнала.

В зависимости от выбора уровня индекса дополнительной модуляции получаем возможность выбора уровня дополнительного сигнала больше либо меньше уровня фонового шума.

Проведем исследование возможности передачи информации по дополнительному каналу передачи информации в составе основного сигнала при условии, что уровень дополнительного сигнала меньше спектральной плотности мощности шума $A\mathcal{G} < N_0$.

Пусть длительность символа дополнительного сигнала равна 0,016 с (с применением расширяющей ПСП длиной 8191 символ). Тогда эквивалентная (энергетическая) шумовая полоса приемника будет равна $\Delta f = \frac{1}{\tau} = 62,38 \text{ Гц}$.

Оценим уровень фонового шума в полосе приема (включая атмосферный шум, космическое фоновое излучение, температурный шум антенны, потери в линии передачи, шум усиления), который поступает на вход приемного устройства с антенной с эквивалентной шумовой температурой $T_A^ш = 290 \text{ К}$. Уровень мощности шума в полосе приема составит [2]:

$$P_{ш} = k\Delta f T_A^ш,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана.

При указанных значениях уровень мощности шума в полосе приема будет равен $P_{ш} = -186 \text{ дБВт}$.

Если мощность передаваемого дополнительного сигнала выбрана таким образом, что -161 дБВт достигает приемника, то отношение сигнал/шум в 25 дБ позволит осуществить корреляционный прием информации, при условии того, что на приемной стороне имеется необходимая, для корреляционного приема, структура расширяющей ПСП.

При отсутствии информации о расширяющей ПСП приемная сторона вынуждена осуществлять прием дополнительного сигнала по битно (чипово). Отсюда следует, что шумовая полоса приемника должна быть $\Delta f = 0,5 \text{ МГц}$. При этом, даже при наличии гипотетической антенны с шумовой температурой $T_A^ш = 290 \text{ К}$, мощность шума в полосе приема составит -149 дБВт , что на 12 дБ больше мощности сигнала. При таком отношении сигнал/шум прием дополнительного сигнала невозможен.

Выше изложенный способ передачи информации был промоделирован с использованием графической среды разработки и программирования Labview.

III. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛЬНО-КОДОВОЙ КОНСТРУКЦИИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ КВАДРАТУРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Принцип формирования и передачи сигнално-кодовой конструкции с дополнительной квадратурной модуляцией показан на рис. 2.

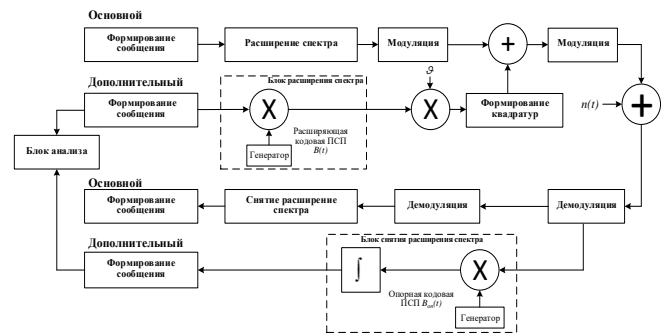


Рис. 2. Имитационная модель исследования формирования и передачи сигнално-кодовой конструкции с дополнительной квадратурной модуляцией.

На основе имитационной модели исследования формирования и передачи сигнално-кодовой конструкции с дополнительной квадратурной модуляцией разработана программная модель в графической среде разработки и программирования LabVIEW.

Входными данными для работы программной модели являются [3]:

- данные для передачи по дополнительному каналу;
- степень полинома расширяющей последовательности;
- индекс дополнительной модуляции;
- вид модуляции;
- отношение сигнал/шум.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование было проведено при следующих условиях:

- передаваемая информация – 10010000101000;
- степень полинома расширяющей последовательности – 13;
- индекс дополнительной модуляции – 0,01;
- вид модуляции – ФМн-4 (QPSK);
- отношение сигнал/шум – 25 дБ.

Выходными данными работы программной модели являются:

- векторная диаграмм основного сигнала;
- векторная диаграмм основного и дополнительного сигналов;
- спектр принимаемого сигнала;
- корреляционная функция принимаемого сигнала.

Отображение векторной диаграммы основного и дополнительного сигналов представлено на рис. 3.

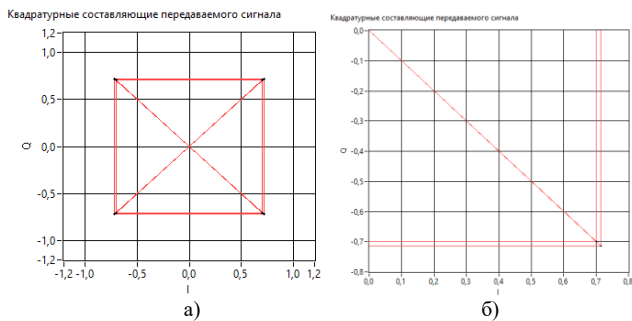


Рис. 3. Векторная диаграмм основного и дополнительного сигналов

На диаграмме отчетливо видны сигнальные точки множества модулирующих символов основного сигнала, соответствующие ± 1 В (символы «0» и «1»). Сигнальные точки последовательности данных дополнительного сигнала, соответствующие $\pm A\theta$ В, расположены в сигнальных точках основного сигнала, однако при данном масштабе отображения структуры сигналы плохо различимы. При увеличении масштаба, как показано на рис. 3б, на диаграмме становятся видны точки дополнительного сигнала.

При приеме навигационного сигнала в смеси с шумом векторная диаграмма будет иметь вид, представленный на рис. 4. На фоне шума дополнительный сигнал неразличим.

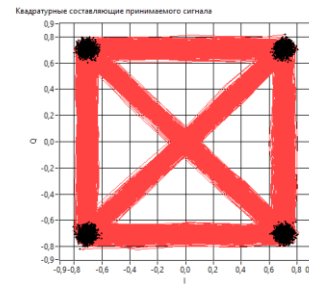


Рис. 4. Векторная диаграмм основного и дополнительного сигналов в смеси с шумом

На рис. 5 представлен спектр принимаемого сигнала. В частотной области, а также на векторной диаграмме, легко различим основной сигнал. Дополнительный сигнал не различим на фоне шумов и основного сигнала. Выделить информацию дополнительного канала без знания структуры расширяющей ПСП невозможно.

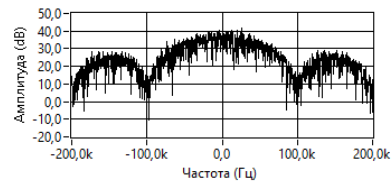


Рис. 5. Спектр принимаемого сигнала

На рис. 6 представлена корреляционная функция принимаемого сигнала, структура расширяющей ПСП которого известна. Положительные и отрицательные пики соответствуют свертке с опорными сигналами, соответствующими информационным символам «0» и «1».

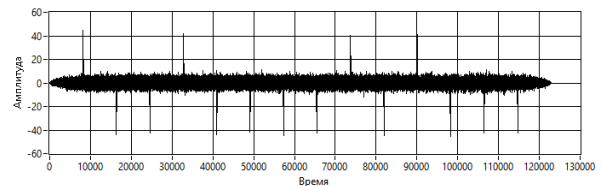


Рис. 6. Корреляционная функция принимаемого сигнала.

Таким образом, без знания расширяющей ПСП дополнительного сигнала, возможно обнаружение и прием только основного сигнала.

Оценим вероятность правильного обнаружения дополнительного сигнала. В первом случае на приемной стороне структура расширяющей ПСП известна, во втором – не известна.

Будем полагать вероятность ложной тревоги $P_{лт} = 0,1$. Вероятность правильного обнаружения при когерентном приеме в простейшем случае определяется соотношением [1, 4, 5]:

$$P_{по} = \Phi\left(q - \Phi^{-1}(1 - P_{лт})\right),$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция Крампа, q – отношение энергии сигнала E_s к спектральной плотности мощности шума N_0 .

Во втором случае, когда структура расширяющей ПСП не известна, будем полагать, что осуществляется поэлементный прием и энергия сигнала для него определяется в этом случае амплитудой сигнала и длительностью одного бита (чипа) τ . В первом случае, когда структура расширяющей ПСП известна, энергия сигнала будет определяться длительностью информационного бита $\tau_b = \tau B = \tau L$, где B – база сигнала, численно равная длине расширяющей ПСП L .

Таким образом, отношение сигнал/шум в первом случае будет в B раз больше: $q_u = q_n B$. На рис. 7 представлены зависимости правильного обнаружения дополнительного сигнала от отношения энергии одного бита расширяющей ПСП (чипа) к спектральной плотности мощности шума: $q_{экс} = E_s / N_0$. Кривая 1 соответствует по-элементному приему сигнала, кривые 2, 3 и 4 соответствуют приему сигнала при известной структуре ПСП для длин расширяющей ПСП $L = 511, 8191, 16383$ элементов соответственно.

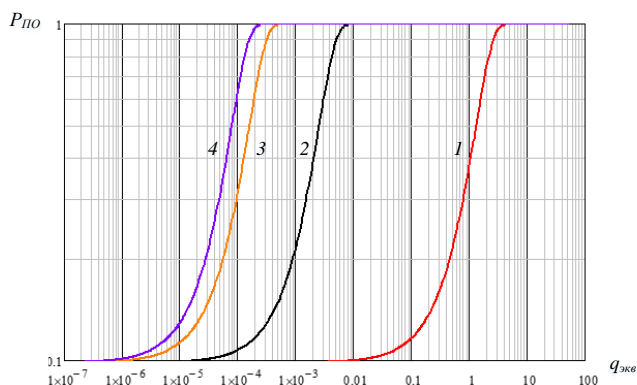


Рис. 7. Зависимость вероятности правильного обнаружения дополнительного сигнала от отношения сигнал/шум

Из графиков видно, что при $q_{экс} < 1$ (0 дБ) без знания структуры расширяющей ПСП осуществить поэлементный прием невозможно. В то же время зная структуру расширяющей ПСП, длина которой составляет 8191 элемент, при $q_{экс} = 2 \cdot 10^{-4}$ (-37 дБ) реальное отношение сигнал/шум составляет $q = 3,3$ (5,2 дБ), а вероятность правильного обнаружения $P_{по} = 0,997$.

V. ВЫВОД

Проведенный анализ возможности применения сигнально-кодовой конструкции с дополнительной квадратурной модуляцией для передачи любого рода информации по космическим радиолиниям показал, что рассмотренная сигнально-кодовая конструкция дает возможность, при определенном выборе индекса дополнительной модуляции, передавать дополнительный сигнал ниже уровня шумов, тем самым повышать скрытность передачи информации.

Такой способ передачи информации может быть применен при передаче любой информации ограниченного распространения (конфиденциальной), которая предназначена узкому кругу лиц. Факт передачи информации ограниченного распространения (конфиденциальной) будет известен только легальному пользователю. Даже если злоумышленник узнает о факте передачи информации, без знания расширяющей ПСП не сможет осуществить ее прием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дятлов А.П., Кульбикаян Б.Х. Корреляционная обработка широкополосных сигналов в автоматизированных комплексах радиомониторинга. М: Горячая линия – Телеком. 2013. 332.
- [2] Спутниковая связь и вещание: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. / В.А. Бартенев, Г.В. Болотов, В.Л. Быков и др; под ред. Л.Я. Кантора. М.: Радиоисвязь, 1997. 528.
- [3] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611558 / В.А. Крягин, С.В. Штанько, П.Н. Топчий. Программная модель формирования и передачи сигнально-кодовой конструкции с дополнительной квадратурной модуляцией; Дата рег. 23.01.2023
- [4] Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь. 1983. 220.
- [5] Ипатов В.П., Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А. и др. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах. М.: Сов.Радио, 1975. 296.