



ФИЗИКА

УДК 537.87;621.394.6

ПРИЕМ СВЕРХКОРОТКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЕ

В. А. Иванченко, В. Е. Кузнецов, В. В. Николаев

Научно-исследовательский институт механики и физики
Саратовского государственного университета
E-mail: mf@sgu.ru

Разработан алгоритм детектирования последовательности сверхкоротких радиоимпульсов, распространяющихся в дисперсионной среде, по спектру сигнала. Рассмотрена техническая реализация устройства для детектирования.

Ключевые слова: сверхкороткий радиоимпульс, дисперсия, спектр сигнала, фаза импульса, детектирование.

Reception of Ultrashort Radio Pulses Propagating in a Dispersion Medium

V. A. Ivanchenko, V. E. Kuznetsov, V. V. Nikolaev

Signal spectrum detection algorithm of ultrashort radio pulses sequence propagating in a dispersion medium is developed. Technical implementation of detection device is considered.

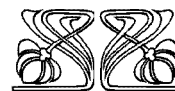
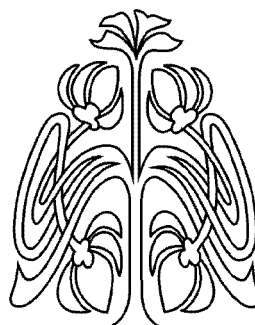
Key words: ultrashort radio pulse, dispersion, signal spectrum, pulse phase, detection.

Анализ влияния дисперсии в атмосфере на форму сверхкоротких радиоимпульсов (СКИ) длительностью 0.5–1 нс с несущей частотой 3 ГГц показал, что уже на расстояниях порядка нескольких километров детектирование таких импульсов «обычным» способом не может быть осуществлено. Рассмотрим возможность получения информации по анализу спектра сигнала, представляющего собой последовательность искаженных СКИ с разной фазой («0» или «π»).

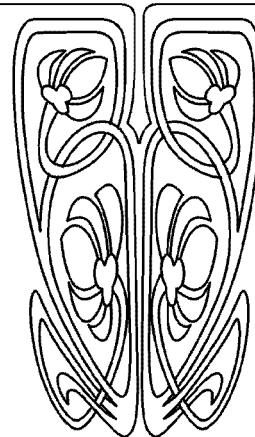
Предположим, что несущий информацию сигнал представляет собой последовательность отдельных пакетов N импульсов (например, $N = 8$, что соответствует одному байту), каждый из которых полностью укладывается в некоторый интервал времени T . Тогда каждый принятый на расстоянии r импульсный пакет можно представить в виде

$$s_n(t, r) = \sum_{i=0}^{N-1} C_{ni} p(t - t_n - i\Delta t, r), \quad (1)$$

где n – номер импульсного пакета; t – время; $t_n = t_0 + nT$; t_0 – момент времени, когда сигнал достигает приёмного устройства (время задержки); C_{ni} – последовательность чисел, принимающих значения 1 и -1, соответствующие фазам «0» и «π»; $p(t, r)$ – форма одиночного импульса на расстоянии r ; Δt – временной интервал между началом i -го и началом $(i + 1)$ -го импульсов в пакете, именуемый далее периодом следования импульсов.



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





На интервале $[t_n, t_n + T)$ сигнал $s_n(t, r)$ можно представить в виде ряда Фурье:

$$s_n(t, r) = \frac{A_{n0}(r)}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[A_{nm}(r) \cos\left(\frac{2\pi m(t-t_n)}{T}\right) + B_{nm}(r) \sin\left(\frac{2\pi m(t-t_n)}{T}\right) \right],$$

где

$$A_{n0}(r) = \frac{2}{T} \int_0^T s_n(t+t_n, r) dt = 0,$$

$$A_{nm}(r) = \frac{2}{T} \int_0^T s_n(t+t_n, r) \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt, \quad (2)$$

$$B_{nm}(r) = \frac{2}{T} \int_0^T s_n(t+t_n, r) \sin\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt. \quad (3)$$

Подставив (1) в формулы (2), (3), получим:

$$A_{nm}(r) = a_m(r) \sum_{i=0}^{N-1} C_{ni} \cos\left(\frac{2\pi ni\Delta t}{T}\right) - b_m(r) \sum_{i=0}^{N-1} C_{ni} \sin\left(\frac{2\pi ni\Delta t}{T}\right), \quad (4)$$

$$B_{nm}(r) = b_m(r) \sum_{i=0}^{N-1} C_{ni} \cos\left(\frac{2\pi ni\Delta t}{T}\right) + a_m(r) \sum_{i=0}^{N-1} C_{ni} \sin\left(\frac{2\pi ni\Delta t}{T}\right), \quad (5)$$

где $a_m(r)$, $b_m(r)$ — коэффициенты ряда Фурье для функции $p(t, r)$:

$$a_m(r) = \frac{2}{T} \int_0^T p(t, r) \cos\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt, \quad b_m(r) = \frac{2}{T} \int_0^T p(t, r) \sin\left(\frac{2\pi mt}{T}\right) dt.$$

Используя равенства (4), (5), получим систему линейных алгебраических уравнений для определения искомых коэффициентов C_{ni} , которая для чётных значений N будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^{N-1} C_{ni} \cos\left(\frac{2\pi n_k i \Delta t}{T}\right) = \frac{a_{m_k}(r) A_{nm_k}(r) + b_{m_k}(r) B_{nm_k}(r)}{a_{m_k}^2(r) + b_{m_k}^2(r)} \\ \sum_{i=0}^{N-1} C_{ni} \sin\left(\frac{2\pi n_k i \Delta t}{T}\right) = \frac{a_{m_k}(r) B_{nm_k}(r) - b_{m_k}(r) A_{nm_k}(r)}{a_{m_k}^2(r) + b_{m_k}^2(r)} \end{array} \right\}_{k=1}^{N/2}, \quad (6)$$

где m_k — последовательность $N/2$ целых чисел, выбранных таким образом, чтобы выполнялись условия:

$$\left| \begin{array}{cccccc} 1 & \cos\left(\frac{2\pi m_1 \Delta t}{T}\right) & \dots & \cos\left(\frac{2\pi m_1 i \Delta t}{T}\right) & \dots & \cos\left(\frac{2\pi m_1 (N-1) \Delta t}{T}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi m_1 \Delta t}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{2\pi m_1 i \Delta t}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{2\pi m_1 (N-1) \Delta t}{T}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cos\left(\frac{2\pi m_k \Delta t}{T}\right) & \dots & \cos\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right) & \dots & \cos\left(\frac{2\pi m_k (N-1) \Delta t}{T}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi m_k \Delta t}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{2\pi m_k (N-1) \Delta t}{T}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cos\left(\frac{2\pi m_{N/2} \Delta t}{T}\right) & \dots & \cos\left(\frac{2\pi m_{N/2} i \Delta t}{T}\right) & \dots & \cos\left(\frac{2\pi m_{N/2} (N-1) \Delta t}{T}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi m_{N/2} \Delta t}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{2\pi m_{N/2} i \Delta t}{T}\right) & \dots & \sin\left(\frac{2\pi m_{N/2} (N-1) \Delta t}{T}\right) \end{array} \right| \neq 0, \quad (7)$$



$$a_{m_k}^2(r) + b_{m_k}^2(r) \neq 0 \quad \forall k = 1, 2, \dots, N/2. \quad (8)$$

Параметры $A_{nm}(r)$, $B_{nm}(r)$ являются измеряемыми величинами, но $a_m(r)$, $b_m(r)$, также входящие в систему (6), неизвестны.

Предположим, что информационный блок, состоящий из последовательности пакетов СКИ, содержит пакет опорных импульсов с фазами «0», идущий в начале (т.е. при $n = 0$). Для пакета опорных импульсов уравнения (4), (5) примут вид

$$A_{0m}(r) = a_m(r) \sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi m i \Delta t}{T}\right) - b_m(r) \sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi m i \Delta t}{T}\right), \quad (9)$$

$$B_{0m}(r) = b_m(r) \sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi m i \Delta t}{T}\right) + a_m(r) \sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi m i \Delta t}{T}\right). \quad (10)$$

Используя равенства (9), (10), получим формулы для нахождения коэффициентов ряда Фурье одиночного импульса:

$$a_{m_k}(r) = \frac{A_{0m_k} \sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right) + B_{0m_k} \sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right)}{\left[\sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right)\right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right)\right]^2}, \quad (11)$$

$$b_{m_k}(r) = \frac{B_{0m_k} \sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right) - A_{0m_k} \sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right)}{\left[\sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right)\right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right)\right]^2}, \quad (12)$$

из которых вытекают дополнительные условия выбора чисел m_k :

$$\left[\sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right)\right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi m_k i \Delta t}{T}\right)\right]^2 \neq 0 \quad \forall k = 1, 2, \dots, N/2, \quad (13)$$

т.е. m_k должны быть выбраны таким образом, чтобы суммы косинусов и синусов не обращались одновременно в ноль.

Таким образом, если сигнал представляет собой последовательность равных по длительности пакетов сверхкоротких импульсов с фазами «0» и « π », причем первый пакет является опорным, т.е. содержащим СКИ с фиксированной фазой (например, с фазой «0»), то детектирование по спектру возможно и проводится в два этапа. Сначала измеряются спектральные амплитуды опорного пакета и по формулам (11), (12) находятся коэффициенты ряда Фурье одиночного импульса. Затем измеряются спектральные амплитуды несущих информацию импульсных пакетов и, используя найденные спектральные характеристики одиночного импульса, из системы линейных уравнений (6) определяются числа C_{ni} , которые содержат закодированную информацию. Если пакет содержит чётное число импульсов, то достаточное

для решения данной задачи количество частот равно половине числа импульсов в пакете. При этом номера гармоник, на которых проводятся измерения, должны быть выбраны так, чтобы выполнялись условия (7), (8) и (13).

Анализируя полученные результаты, следует отметить три важных момента. Во-первых, форма СКИ считалась произвольной, поэтому полученные результаты справедливы для любых искаженных и неискаженных импульсов, если они могут быть разложены в ряд Фурье на интервале времени T . Во-вторых, в отличие от «обычного» данный способ детектирования не накладывает никаких ограничений на соотношение периода следования импульсов в пакете и их длительности за исключением того, что должны выполняться условия (7), (8) и (13). Детектирование последовательности СКИ по предложенному алгоритму может осуществляться, даже если период следования импульсов меньше длительности самих



импульсов, т.е. в случае перекрытия отдельных СКИ в пределах пакета. Этот факт, в принципе, позволяет многократно повысить плотность передаваемой информации. В-третьих, совершенно очевидно, что в реальных условиях будут определяться не исходные значения коэффициентов C_{ni} , а некоторые числа

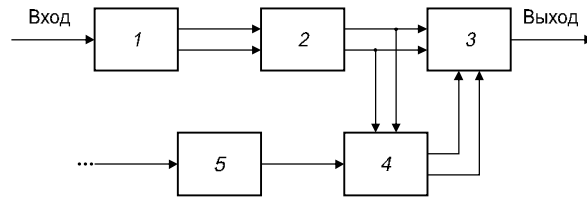
$$\tilde{C}_{ni} = C_{ni} + \Delta C_{ni},$$

где ΔC_{ni} – погрешности определения коэффициентов C_{ni} . Наличие и величина этих погрешностей обусловлены рядом факторов, среди которых ограниченная точность измерения спектральных компонент принимаемого сигнала, неполная идентичность формы генерируемых импульсов, изменение условий прохождения сигнала в пространстве, связанное с движением передатчика или приёмника, и т.д. Однако носителем информации является не значение коэффициента C_{ni} , а его знак. Поэтому информация не теряется, если выполняется условие

$$\left| \Delta C_{ni} \right|_{\max} < 1,$$

где $\left| \Delta C_{ni} \right|_{\max}$ — максимальное значение погрешности ΔC_{ni} по модулю. Если произойдет наложение импульсов друг на друга в пределах пакета, то это не приведет к увеличению погрешности определения величин C_{ni} , поскольку, как отмечалось выше, расчетные формулы справедливы и для такого случая. Однако если влияние дисперсии столь велико, что имеет место частичное перекрытие отдельных импульсных пакетов, то возникнет дополнительный источник погрешности. Эта проблема может быть решена увеличением временного интервала следования импульсных пакетов. Для предотвращения связанного с этим уменьшения плотности передаваемой информации следует пропорционально увеличить количество импульсов в пакете.

Детектирование полезного сигнала может быть осуществлено по схеме на рисунке, которая состоит из Фурье-преобразователя 1, аналоговой схемы 2, схемы сравнения 3, запоминающего устройства 4 и схемы синхронизации 5. Фурье-преобразователь 1 может быть построен на линиях задержки, аналоговых четырёхквadrантных



перемножителях на полевых транзисторах СВЧ и симметрирующих трансформаторах в виде СВЧ-микросборки. Подаваемый на вход нормированный входной сигнал должен преобразовываться в реальное время с использованием линий задержки для развертывания по времени. Четырёхквadrантные перемножители, соединенные по схеме быстрого преобразования Фурье, должны иметь жёстко заданные резисторами коэффициенты усиления. На выходе такого преобразователя можно получить все необходимые для детектирования текущие значения синусных и косинусных составляющих требуемых гармоник. Аналоговая схема 2 должна будет преобразовать эти сигналы в величины C_{ni} , представленные напряжением. Значения C_{ni} , полученные для первого импульса в пакете, должны запоминаться в устройстве 4 на весь период приёма пакета. Запоминание может производиться в конденсаторах с помощью полевых транзисторов. Команду на запоминание C_{ni} первого импульса в пакете должна выдать схема синхронизации 5. Схема сравнения 3 должна на скорости передачи данных производить сравнение текущих значений C_{ni} с запомненными и принимать решение о значении передаваемого бита информации. Для повышения достоверности цифрового потока могут быть использованы результаты работы [1]. Такой детектор по устройству схож с самокорреляционным, но отличается в лучшую сторону тем, что в корреляции участвует не весь входной сигнал заданного диапазона, а математически выбранные и обработанные его компоненты.

Список литературы

1. Зубарев Ю. Б., Золотарев В. В., Овечкин Г. В., Дмитриева Т. А. Многопороговые алгоритмы для спутниковых сетей с оптимальными характеристиками // Электросвязь. 2006. № 10. С. 9–11.