

СИГНАЛ БАРКЕРА НА ИОНОСФЕРНОЙ ТРАССЕ

Г.М.Стрелков, А.В.Коновалова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН

E-mail: strelkov@ms.ire.rssi.ru

Изложены результаты анализа характера и скорости нарастания искажений радиоимпульса прямоугольной формы, сформированного на основе кода Баркера, при распространении по протяженной ионосферной трассе. Анализ выполнен применительно к декаметровому диапазону длин волн, для которого эффект частотной дисперсии проявляется наиболее заметно.

Установлено определяющее влияние длительности сигнала и частоты заполнения на уровень деформации начальной огибающей. Принципиальное значение при этом имеет кратность длительности элемента сигнала периоду высокочастотных колебаний. Определены характерные длины трассы, на которых может происходить распад автокорреляционной функции радиосигнала.

Радиосигнал на основе кода Баркера (далее –СБ) является наиболее известным из двоичных фазоманипулированных сигналов, свойства корреляционных характеристик которых обуславливают их широкое применение в радиосистемах [1]. Поэтому возникает вопрос о возможном характере искажений таких сигналов, обуславливаемых влиянием среды распространения, в частности, ионосферы. При прохождении ионосферной трассы фазоманипулированный сигнал заведомо искажается и его корреляционные характеристики деформируются. Особенности и уровень дисперсионных искажений фазоманипулированных сигналов и их частного случая – сигналов Баркера, однако, до настоящего времени совершенно не изучены. Причиной являются значительные трудности при описании дисперсионных искажений радиоимпульсов даже простейшей формы (в частности, прямоугольной) на основе интеграла Фурье. В [2] изложено альтернативное интегралу Фурье решение задачи о распространении радиоимпульса в холодной столкновительной плазме. Оно не содержит ограничений по виду его начальной огибающей, по занимаемой им частотной полосе и закону частотной модуляции, а также по длине трассы. В докладе представлены результаты теоретического анализа на основе решения [2] закономерностей и особенностей искажений сигналов Баркера, распространяющихся по протяженной ионосферной трассе. Анализ выполнен применительно к декаметровым волнам, на которых влияние частотной дисперсии проявляется в наибольшей степени. В литературе этот вопрос ранее не затрагивался.

Сигнал Баркера представляет собой совокупность N прямоугольных импульсов (элементов сигнала) одинаковой длительности, которые излучаются последовательно и начальные фазы колебаний (0 или π) которых определяются кодовой последовательностью Баркера. Модуль огибающей СБ представляет собой прямоугольник, однако, его спектральные и корреляционные характеристики иные, чем у прямоугольного импульса. На рис. 1 сопоставлены энергетические

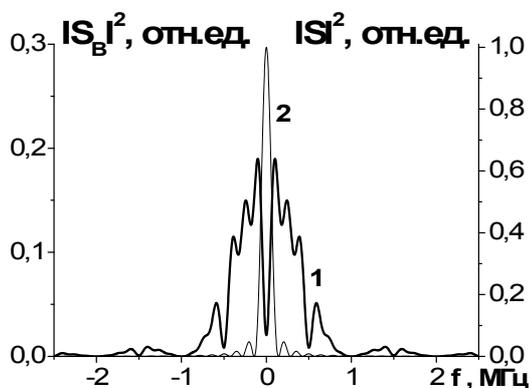


Рис. 1. Энергетические спектры огибающей сигнала Баркера (1; $t_{и} = 7 \cdot 10^{-6}$ с; $N = 7$) и огибающей прямоугольного радиоимпульса (2; $t_{и} = 7 \cdot 10^{-6}$ с).

ческие спектры СБ ($N = 7$) и прямоугольного импульса с равными длительностью и энергией. Спектр СБ в несколько раз шире и имеет усложненную структуру.

Начальная огибающая сигнала Баркера имеет вид:

$$A(0;t) = \begin{cases} A_1 = A_0 \cdot \exp[i\alpha_1 \pi], & 0 < t \leq \frac{1}{N}t_n; \\ \dots \\ A_k = A_0 \cdot \exp\left[i\left(\alpha_k \pi - \frac{k-1}{N} \omega' t_n\right)\right], & \frac{k-1}{N}t_n < t \leq \frac{k}{N}t_n; \\ \dots \\ A_N = A_0 \cdot \exp\left[i\left(\alpha_N \pi - \frac{N-1}{N} \omega' t_n\right)\right], & \frac{N-1}{N}t_n < t \leq t_n. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $1 \leq k \leq N$; t – время; α_k – кодовая последовательность Баркера (0 или 1); t_n – длительность сигнала; A_0 – амплитуда элемента сигнала; $\omega' = 2\pi f'$; f' – несущая частота.

В соответствии с [2] текущие искажения огибающей СБ описываются выражениями: при $0 \leq (k-1)t_n/N < t' \leq kt_n/N \leq t_n$ –

$$A(z;t') = A_k(0;t') \left[1 - \int_0^{t'-(k-1)t_n/N} \frac{\sqrt{\delta}}{\sqrt{\theta}} J_1(2\sqrt{\delta\theta}) \exp(-(v_{эф} + i\omega')\theta) d\theta \right] - \sum_{p=1}^{k-1} A_p(0;t') \int_{t'-pt_n/N}^{t'-(p-1)t_n/N} \frac{\sqrt{\delta}}{\sqrt{\theta}} J_1(2\sqrt{\delta\theta}) \exp(-(v_{эф} + i\omega')\theta) d\theta \quad (2)$$

и при $t' > t_n$ –

$$A(z;t') = - \sum_{k=1}^N A_k(0;t') \int_{t'-kt_n/N}^{t'-(k-1)t_n/N} \frac{\sqrt{\delta}}{\sqrt{\theta}} J_1(2\sqrt{\delta\theta}) \exp(-(v_{эф} + i\omega')\theta) d\theta. \quad (3)$$

В (2) и (3): $v_{эф}$ – эффективная частота соударений; $\delta = \omega_0^2 z/(2c)$; $t' = t - z/c$; c – скорость света; $\omega_0 = (31,81 \cdot 10^8 \cdot N_e)^{0,5}$ – плазменная частота; N_e – электронная концентрация; $t' = t - z/c$; c – скорость света; z – длина трассы.

На рис.2 представлены характерные варианты деформации квадрата модуля огибающей СБ, вначале представляющего собой прямоугольник, на примере $N = 7$. Кодовая последовательность в этом случае имеет вид: $\alpha_k = (0; 0; 0; 1; 1; 0; 1)$. Значения параметров среды и импульса приведены в подписи. Возникновение характерных деталей у квадрата модуля огибающей обусловлено, в частности, соотношением между длительностью элемента сигнала, то-есть величиной $t_3 = t_n/N$, и периодом колебаний для несущей частоты $T = 1/f'$. Если длительность элемента сигнала кратна периоду, так что отношение $t_3/T = m$ – целое число, скачки фазы имеют при переходе к четвертому, шестому и седьмому элементам сигнала. Их следствием являются возмущение движения и дополнительное излучение электронной компоненты среды. Последнее приводит к возмущению поля в распространяющемся импульсе в пределах некото-

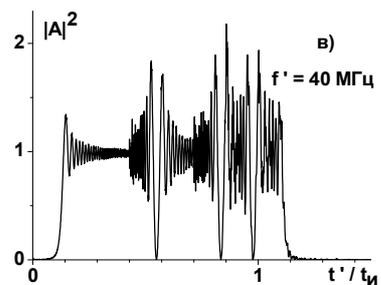
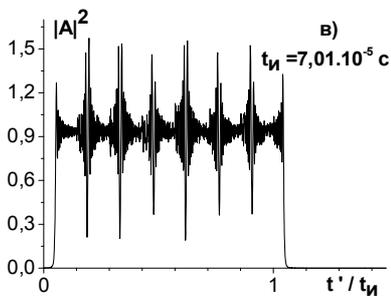
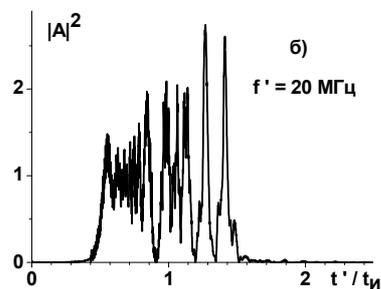
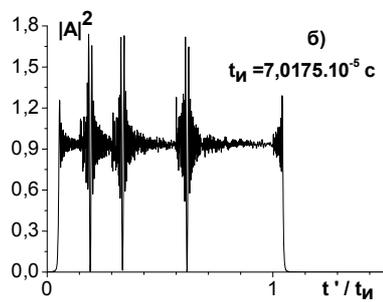
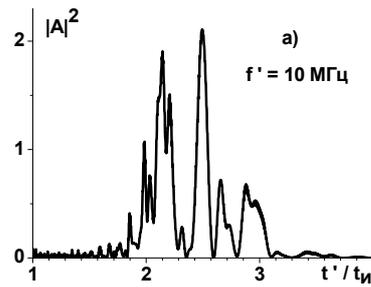
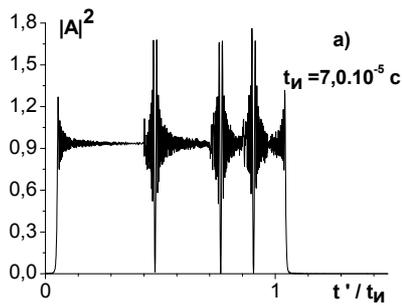


Рис.2. Влияние кратности длительности элемента сигнала периоду несущей частоты на характер деформации огибающей СБ на ионосферной трассе при $z = 100$ км; $N_e = 10^5$ см $^{-3}$ и $\nu_{эф} = 10^4$ с $^{-1}$ ($f' = 20$ МГц; $N = 7$).

Рис.3. Влияние несущей частоты на уровень искажений огибающей СБ на ионосферной трассе при $z = 100$ км; $N_e = 10^5$ см $^{-3}$ и $\nu_{эф} = 10^4$ с $^{-1}$ ($t_и = 7,0 \cdot 10^{-6}$ с; $N = 7$).

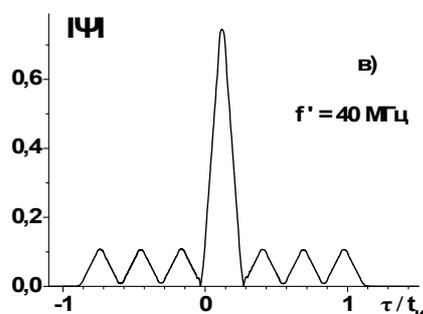
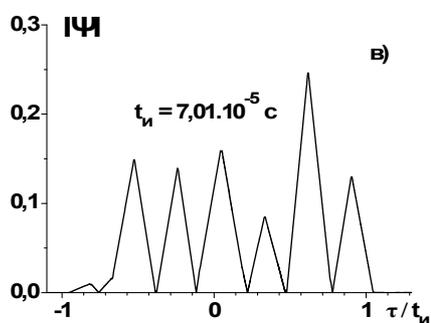
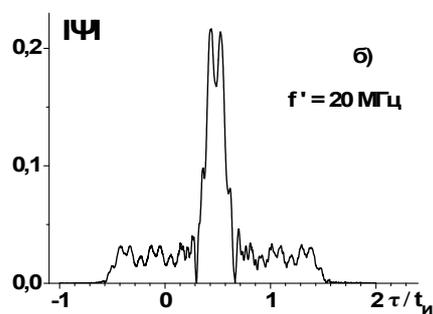
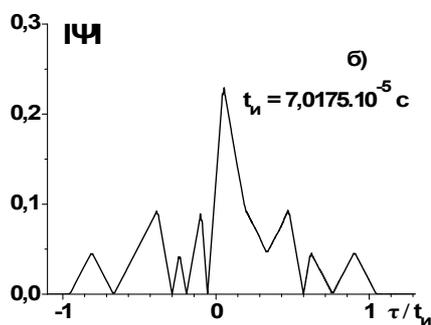
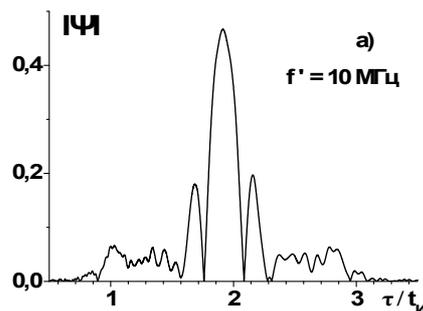
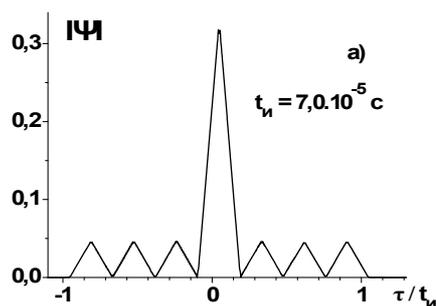


Рис.4. Влияние кратности длительности элемента сигнала периоду несущей частоты на характер деформации АКФ СБ на ионосферной трассе при $z = 100$ км; $N_e = 10^5$ см⁻³ и $\nu_{эф} = 10^4$ с⁻¹ ($f' = 20$ МГц; $N = 7$).

Рис.5. Влияние несущей частоты на уровень искажений АКФ СБ на ионосферной трассе при $z = 100$ км; $N_e = 10^5$ см⁻³ и $\nu_{эф} = 10^4$ с⁻¹ ($t_{и} = 7,0 \cdot 10^{-6}$ с; $N = 7$).

рых временных интервалов, следующих за моментами скачков фазы (рис.2а). Если выполняется условие $t_{\text{с}} / T = m + 1/2$, то, как легко показать, скачки фазы происходят при переходе ко

второму, третьему и пятому элементам СБ. Соответственно смещаются и интервалы возмущения огибающей (рис.2б). Наконец, если отношение t_3/T равно любой иной дроби, скачки фазы (не равные π) происходят при переходе к каждому последующему элементу. В результате каждый из переходов сопровождается возмущением огибающей (рис.2в). Обратим внимание, что кривым на рис.2 отвечают значения t_n , различающиеся всего на десятые доли процента.

Кривые рис.3 построены применительно к случаю $t_3/T = m$ и показывают, что при прочих равных условиях варьирование несущей частоты (точнее, ее уменьшение) может сопровождаться весьма значительным нарастанием уровня искажений огибающей. Естественно связать такое нарастание с поведением высокочастотного крыла спектра излучения электронов.

Сопоставим теперь кривые $|A|^2$ на рис.2а и 3б. Им соответствуют одинаковые значения параметров за исключением длительности импульса, значение которой для рис.3б на порядок меньше. При укорочении импульса структура огибающей заметно усложняется и, вообще говоря, теряет признаки регулярности. Теперь о распространяющемся импульсе можно говорить скорее как о сложной интерференционной структуре. Объяснение нарастания искажений огибающей при уменьшении t_n состоит в том, что при этом временные интервалы, в пределах которых происходит деформация огибающей из-за скачков фазы, составляют все большую относительную долю длительности импульса и, тем более, длительности его элемента.

Деформации огибающей СБ означает и деформацию его автокорреляционной функции

$$\Psi(z; \tau) = \frac{1}{\sqrt{W_n(0)W_n(z)}} \int_{\tau}^{t_n+\tau} A^*(0; t'-\tau) A(z; t') dt'. \quad (4)$$

Здесь $W_n(0)$ и $W_n(z)$ – начальная и текущая энергии сигнала, τ – временной сдвиг, а остальные обозначения введены выше. На рис.4а,б,в представлены модули АКФ сигналов, огибающие которых изображены на рис.2а,б,в соответственно. Они показывают, что отклонение отношения t_3/T от целого значения должно приводить к полному разрушению АКФ СБ в смысле исчезновения у нее сколько-нибудь выраженного пика. Напротив, при выполнении условия $t_3/T = m$ АКФ СБ представляет собой достаточно устойчивую структуру по отношению к варьированию несущей частоты. Модули АКФ на рис.5а,б,в отвечают огибающим на рис.3а,б,в соответственно. Огибающие на рис.3а и 3б практически не содержат признаков своей первоначальной структуры. Однако, соответствующие им АКФ сохраняют выраженные максимумы. На рис.5в АКФ близка к своему первоначальному виду [1] с несколько уменьшенными высотами центрального и боковых пиков. Относительно малая высота центрального пика АКФ на рис.5б обусловлена, по-видимому, тем, что при выбранных значениях параметров задачи максимум функции неопределенности распространяющегося сигнала не принадлежит ее сечению при нулевом доплеровском сдвиге. Исследование функции неопределенности сигналов Баркера в условиях дисперсионных искажений, равно как и анализ возможностей их компенсации, представляет самостоятельную задачу. В заключение заметим, что представленные результаты одновременно демонстрируют эффективность применения решения [2] к анализу дисперсионных искажений при ионосферном распространении сложных радиосигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь. 1985. 384 с.
2. Стрелков Г.М. Сложный радиосигнал в ионосферной плазме. //Радиотехника и электроника. 2008. Т.53. В.9. С.1094-1103.