

УДК 621.396

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-5-70-79

Метод 128-позиционной квадратурной амплитудно-поляризационной манипуляции

П.Е. Корнеев¹

¹ *Егорьевский технологический институт (филиал)
ФГБОУ «Московский государственный технологический университет
"СТАНКИН"», г. Егорьевск, Россия*

Аннотация: Функционирование современных цифровых систем связи, как правило, происходит в сложной помеховой обстановке. Воздействие на систему связи оказывают разнообразные виды помех: как естественные помехи, связанные с условиями распространения радиоволн, так и искусственные помехи, связанные с электромагнитной совместимостью радиотехнических средств, характеристиками каналов связи и т. д. Прикладные вопросы повышения помехозащищенности цифровых систем связи весьма актуальны в настоящее время. При этом повышения помехозащищенности целесообразно достигать рациональными способами, не требующими существенного увеличения энергетики излучаемых сигналов. Методы, основанные на применении алгоритмов обработки специальных видов сигналов, наиболее перспективны на сегодняшний день. Пристальное внимание радиоспециалистов обращено к методам цифровой обработки поляризационно-манипулированных сигналов, которые при сохранении пропускной способности системы связи позволяют получить существенный выигрыш параметров помехозащищенности системы связи. При этом наблюдается удачное сочетание данных методов с уже известными методами цифровой обработки сигналов. В данной статье рассмотрен многопозиционный метод квадратурной амплитудно-поляризационной манипуляции (М-КАПМ), где число позиций $M = 2^7 = 128$ (128-КАПМ). Модуляционный символ при 128-КАПМ состоит из 7-разрядного цифрового кода. Цель данной работы заключается в аналитическом описании метода 128-позиционной квадратурной амплитудно-поляризационной манипуляции при передаче по каналу связи 7-разрядных двоичных модуляционных символов. В ходе математического моделирования сформировано и визуализировано сигнальное созвездие. Приведена структурная схема модулятора. Практическая значимость данной работы заключается в том, что квадратурную амплитудно-поляризационную манипуляцию можно рассматривать как универсальный вид цифровой модуляции, который можно применять вместо известных на сегодняшний день квадратурных видов манипуляции.

Ключевые слова: поляризация радиоволн, квадратурные методы обработки сигнала, поляризационная манипуляция.

Для цитирования: Корнеев П.Е. Метод 128-позиционной квадратурной амплитудно-поляризационной манипуляции // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 5. С. 70–79. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-5-70-79

Method of 128-position quadrature amplitude-polarization manipulation

P.E. Korneev¹

¹ *Yegoryevsk Technological Institute (branch), FSFEI HE Moscow State Technological
University "STANKIN", Yegoryevsk, Russia*

Abstract: The functioning of modern digital communication systems tends to occur in a complex interference environment. The communication system is affected by various types of jamming: both natural noises associated with the conditions of radio waves propagation, and artificial interference concerned with electromagnetic compatibility of radio equipment, characteristics of communication channels, etc. Applied issues of enhancing digital communication systems interference insusceptibility are quite relevant at the present time. Concurrently, it is advisable to achieve an increase in interference insusceptibility by rational methods that do not require a significant increase in the emitted signals energy. The techniques based on the use of algorithms for processing special types of signals are the most promising to this date. Radio specialists address the methods for digital processing of polarization-manipulated signals which, while maintaining the communication system carrying capacity, allow us to obtain an essential gain in the parameters of the communication system interference insusceptibility. At the same time, a successful

combination of these methods with the already known techniques of digital signal processing is noted. This article considers the multi-position method of quadrature amplitude-polarization manipulation (M-QAPM), where the number of positions $M = 2^7 = 128$ (128-QAPM). The modulation symbol at 128-QAPM consists of a 7-bit digital code. The purpose of this article is to describe analytically the method of 128-position quadrature amplitude-polarization manipulation when transmitting 7-bit binary modulation symbols over a communication channel. During mathematical modeling, a signal constellation was formed and visualized. The structural diagram of the modulator was given. The practical significance of the given paper lies in the fact that quadrature amplitude-polarization manipulation can be considered as a universal type of digital modulation, which can be applied instead of the currently known quadrature types of manipulation.

Key words: polarization of radio waves, quadrature methods of signal processing, polarization manipulation.

For citation: Korneev, P.E. (2022). Method of 128-position quadrature amplitude-polarization manipulation. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 5, pp. 70–79. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-5-70-79

Введение

Рассмотрим применение квадратурной амплитудно-поляризационной манипуляции при передаче цифровой информации в линиях связи. Вопросы помехозащищенности при использовании поляризационной манипуляции достаточно глубоко описаны в работах [1–7] и выходят за рамки данной статьи.

Цель данной работы заключается в аналитическом описании метода 128-позиционной квадратурной амплитудно-поляризационной манипуляции при передаче по каналу связи 7-разрядных двоичных модуляционных символов.

Постановка задачи – для метода 128-КАПМ требуется получить математические формулы, описывающие эллиптически поляризованный сигнал и его квадратурные составляющие с построением сигнального созвездия и структурной схемы КАПМ-модулятора.

Этапы решения поставленной задачи

1. Вывод аналитических выражений эллиптически поляризованного сигнала и его квадратурных составляющих.

2. Описание метода 128-КАПМ. Математическое моделирование значений квадратурных составляющих, а также модуля и фазы сигнального вектора для различных значений амплитуды, начальной фазы и геометрических параметров эллипса поляризации эллиптически поляризованной электромагнитной волны.

3. Формирование сигнального созвездия 128-КАПМ радиосигнала.

4. Построение и описание работы структурной схемы КАПМ-модулятора.

Квадратурные составляющие эллиптически поляризованного сигнала

Для передачи цифровой информации в линии связи будем использовать эллиптически поляризованную радиоволну. В [8] показано, что суперпозиция двух волн круговой поляризации с противоположным направлением вращения, имеющих относительный сдвиг фаз и различные амплитуды, дает в результате эллиптически поляризованную волну. Поэтому считаем, что в антенной системе цифровой радиолинии связи реализован круговой поляризационный базис. На практике такой базис может быть реализован в виде двух вложенных друг в друга спиральных антенн противоположного направления вращения вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ или в виде комбинации четвертьволновых фазовых устройств с круглым волноводом. На основе [9] представим эллиптически поляризованный сигнал, изменяющийся во времени t , следующей комплексной функцией:

$$\dot{x}(t) = A_+ e^{j(\omega t + \varphi_+)} + A_- e^{-j(\omega t - \varphi_-)}, \quad (1)$$

где A_+ , φ_+ – амплитуда и начальная фаза правосторонне кругового поляризованного колебания, A_- , φ_- – амплитуда и начальная фаза левосторонне кругового поляризованного колебания, ω – круговая частота, j – мнимая единица.

Выражение (1) преобразуем в вид с присутствием в явном виде параметров, непо-

средственно характеризующих поляризационную структуру сигнала [8]:

$$\dot{x}(t) = A \cdot e^{j\beta} \left[\cos(\alpha) \cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\alpha) \sin(\omega t + \varphi) \right], \quad (2)$$

где A и φ – амплитуда и начальная фаза эллиптически поляризованного сигнала, α – угол эллиптичности, β – угол ориентации эллипса поляризации. При этом $-\pi < \varphi \leq \pi$, $-\pi/2 < \beta \leq \pi/2$, $-\pi/4 \leq \alpha \leq \pi/4$.

Связь параметров волн круговой и эллиптической поляризаций представлена формулами

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{A_1^2 + A_2^2}; \\ A_1 &= A_+ + A_- = A \cdot \cos(\alpha); \\ A_2 &= A_+ - A_- = A \cdot \sin(\alpha); \\ \varphi &= \frac{\varphi_+ - \varphi_-}{2}; \quad \beta = \frac{\varphi_+ + \varphi_-}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 1. дано геометрическое определение углов эллиптичности и ориентации эллипса поляризации. Далее примем сокращение ПЭПВ, если применяется правосторонне эллиптически поляризованная волна (направление вращения вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ происходит по часовой стрелке) при наблюдении против направления распространения волны, и ЛЭПВ, если применяется левосторонне эллиптически поляризованная волна (направление вращения вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ происходит против часовой стрелки) при

наблюдении против направления распространения волны [8, 10].

Действительный сигнал, соответствующий (2), будет иметь вид

$$x(t) = A \cdot \left[\cos(\beta) \cos(\alpha) \cos(\omega t + \varphi) - \sin(\beta) \sin(\alpha) \sin(\omega t + \varphi) \right]. \quad (4)$$

Выделим синфазную и квадратурную составляющие эллиптически поляризованного сигнала (4), воспользовавшись тригонометрическими формулами суммы двух аргументов.

$$\begin{aligned} x(t) &= A \cdot [\cos(\beta) \cos(\alpha) \cos(\varphi) - \sin(\beta) \sin(\alpha) \sin(\varphi)] \cdot \cos(\omega t) - \\ &\quad - [\cos(\beta) \cos(\alpha) \sin(\varphi) + \sin(\beta) \sin(\alpha) \cos(\varphi)] \cdot \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (5)$$

Общий вид сигнала будет иметь вид

$$x(t) = I \cdot \cos(\omega t) - Q \cdot \sin(\omega t), \quad (6)$$

где I – синфазная и Q – квадратурная составляющие эллиптически поляризованного сигнала определяются выражениями

$$\begin{aligned} I &= A \cdot \left[\cos(\beta) \cos(\alpha) \cos(\varphi) - \sin(\beta) \sin(\alpha) \sin(\varphi) \right]; \\ Q &= A \cdot [\cos(\beta) \cos(\alpha) \sin(\varphi) + \sin(\beta) \sin(\alpha) \cos(\varphi)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Преобразуем выражение (7), раскрыв произведение тригонометрических функций:

$$\begin{aligned} I &= \frac{A}{4} \cdot [\cos(\beta + \alpha - \varphi) + \cos(\alpha + \varphi - \beta) + \cos(\varphi + \beta - \alpha) + \cos(\beta + \alpha + \varphi) - \\ &\quad - \sin(\beta + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha + \varphi - \beta) - \sin(\varphi + \beta - \alpha) + \sin(\beta + \alpha + \varphi)]; \\ Q &= \frac{A}{4} \cdot [\sin(\varphi + \beta - \alpha) - \sin(\beta + \alpha - \varphi) + \sin(\alpha + \varphi - \beta) + \sin(\varphi + \beta + \alpha) - \\ &\quad - \cos(\beta + \alpha - \varphi) + \cos(\alpha + \varphi - \beta) + \cos(\varphi + \beta - \alpha) - \cos(\beta + \alpha + \varphi)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Введем следующие обозначения для комбинаций углов:

$$\Phi_1 = \beta + \alpha - \varphi; \quad \Phi_2 = \alpha + \varphi - \beta; \quad \Phi_3 = \varphi + \beta - \alpha; \quad \Phi_4 = \beta + \alpha + \varphi. \quad (9)$$

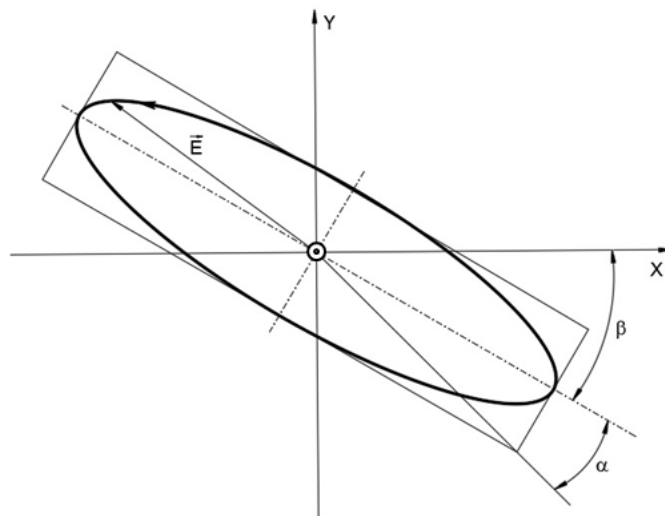


Рис. 1. Геометрические параметры эллипса поляризации
Fig. 1. Geometric parameters of the polarization ellipse

Тогда выражение (8) можно записать в виде

$$I = \frac{A}{4} \cdot [\cos(\Phi_1) + \cos(\Phi_2) + \cos(\Phi_3) + \cos(\Phi_4) - \sin(\Phi_1) - \sin(\Phi_2) - \sin(\Phi_3) + \sin(\Phi_4)];$$

$$Q = \frac{A}{4} \cdot [\sin(\Phi_3) - \sin(\Phi_1) + \sin(\Phi_2) + \sin(\Phi_4) - \cos(\Phi_1) + \cos(\Phi_2) + \cos(\Phi_3) - \cos(\Phi_4)]. \quad (10)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} B &= \cos(\Phi_1) - \sin(\Phi_3); \\ C &= \cos(\Phi_2) + \sin(\Phi_4); \\ D &= \cos(\Phi_3) - \sin(\Phi_1); \\ F &= \cos(\Phi_4) + \sin(\Phi_2). \end{aligned} \quad (11)$$

Окончательные выражения для эллиптически поляризованного сигнала и его квадратурных составляющих примет вид

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{A}{4}(B + C + D + F) \cdot \cos(\omega t) - \\ &- \frac{A}{4}(-B + C + D - F) \cdot \sin(\omega t); \\ I &= \frac{A}{4}(B + C + D + F); \\ Q &= \frac{A}{4}(-B + C + D - F). \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, анализируя (12), видно, что пространственно-временная структура эллиптически поляризованного сигнала при выделении квадратур в системе обработки трансформируется в суперпозицию тригонометрических функций от различных комбинаций трех углов α , β и φ . Нужно отметить, что при реализации модулятора следует предусмотреть усилительный каскад для компенсации четырехкратного уменьшения значения амплитуды эллиптически поляризованного сигнала.

Метод 128-КАПМ

Для передачи двоичных модуляционных символов будем использовать вид цифровой модуляции: многопозиционную квадратурную амплитудно-поляризационную манипуляцию (КАПМ). При 128-КАПМ модуляционный символ состоит из 7-разрядного цифрового кода. При этом число позиций $M = 2^N$, где N – число разрядов в модуляционном символе. Каждый модуляционный символ передается эллиптически поляризованной электромагнитной волной с определенными значениями амплитуды A , начальной фазы φ , угла эллиптичности α и угла ориентации эллипса поляризации β .

Таблица 1
Table 1

Значения амплитуд и начальных фаз при моделировании сигнального созвездия
Values of amplitudes and initial phases in the simulation of the signal constellation

	I квадрант				II квадрант			
A, B	2	3,162	4,472	6	2	3,162	4,472	6
$\varphi, ^\circ$	45	55	35	45	135	145	125	135

	III квадрант				IV квадрант			
A, B	2	3,162	4,472	6	2	3,162	4,472	6
$\varphi, ^\circ$	-135	-125	-145	-135	-45	-35	-55	-45

В ходе математического моделирования сигнального созвездия при 128-КАПМ были применены следующие значения углов эллиптичности $\alpha = 15^\circ$ и 30° . Такой выбор значений углов эллиптичности был определен параметрами коэффициента эллиптичности реальных спиральных антенн, реализующих круговой поляризационный базис [11]. Значения углов ориентации эллипса поляризации были использованы $\beta = 45^\circ$ и -45° для ортогонального взаимного расположения больших осей эллипсов поляризации (реализация поляризационной развязки для повышения помехозащищенности системы) [8].

В табл. 1 приведены используемые значения амплитуд и начальных фаз эллиптически поляризованной волны при моделировании сигнального созвездия при 128-КАПМ [12–15]. Нужно отметить, что начальную фазу эллиптически поляризованного сигнала при заданных значениях углов α и β следует выбирать для I квадранта из интервала $30^\circ < \varphi < 60^\circ$. В противном случае наблюдается эффект «выпадения» сигнального вектора из рабоче-

го квадранта в соседний, что может потребовать дополнительных программно-аппаратных мер для коррекции значений синфазной и квадратурной составляющих эллиптически поляризованного сигнала при реализации КАПМ-модулятора. Для II, III и IV квадрантов также справедливо это замечание с поправкой на угол $\pm \frac{\pi}{2}n$, где $n = 2, 3, 4$.

В табл. 2 представлены значения синфазной I_k и квадратурной Q_k составляющих эллиптически поляризованного сигнала при передаче соответствующего цифрового кода модуляционного символа $M_0M_1M_2M_3M_4M_5M_6$, а также модуль $|A_k|$ и фаза ψ_k ($k = 1 \dots M$) соответствующего сигнального вектора для I квадранта. Значения фазы ψ_k для II, III и IV квадрантов будут отличаться на угол $+\frac{\pi}{2}n$, где $n = 1, 2, 3$ при неизменном значении модуля $|A_k|$.

$$|A_k| = \sqrt{I_k^2 + Q_k^2}; \psi_k = \arctg\left(\frac{Q_k}{I_k}\right). \quad (13)$$

Таблица 2
Table 2

Значения составляющих эллиптически поляризованного сигнала при передаче соответствующего цифрового кода модуляционного символа
Values of the elliptically polarized signal components when transmitting the corresponding digital code of the modulation symbol

$M_0M_1M_2M_3M_4M_5M_6$	Вид поляризации	$\varphi,^\circ$	$\alpha,^\circ$	$\beta,^\circ$	$A, В$	$I_k, В$	$Q_k, В$	$ A_k , В$	$\psi_k,^\circ$
I квадрант									
0000000	ПЭПВ	45	15	45	2	0,707	1,225	$\sqrt{2} = 1,414$	60
0000001	ПЭПВ	45	15	-45	2	1,225	0,707	1,414	30
0000010	ПЭПВ	45	30	45	2	0,366	1,366	1,414	75
0000011	ПЭПВ	45	30	-45	2	1,366	0,366	1,414	15
0000100	ПЭПВ	55	15	45	3,162	0,765	2,101	$\sqrt{5} = 2,236$	70
0000101	ПЭПВ	55	15	-45	3,162	1,713	1,437	2,236	40
0000110	ПЭПВ	55	30	45	3,162	0,195	2,227	2,236	85
0000111	ПЭПВ	55	30	-45	3,162	2,026	0,945	2,236	25
0001000	ПЭПВ	35	15	45	4,472	2,033	2,422	$\sqrt{10} = 3,162$	50
0001001	ПЭПВ	35	15	-45	4,472	2,971	1,082	3,162	20
0001010	ПЭПВ	35	30	45	4,472	1,336	2,866	3,162	65
0001011	ПЭПВ	35	30	-45	4,472	3,150	0,276	3,162	5
0001100	ПЭПВ	45	15	45	6	2,121	3,674	$\sqrt{18} = 4,243$	60
0001101	ПЭПВ	45	15	-45	6	3,674	2,121	4,243	30
0001110	ПЭПВ	45	30	45	6	1,098	4,098	4,243	75
0001111	ПЭПВ	45	30	-45	6	4,098	1,098	4,243	15
0010000	ЛЭПВ	45	15	45	2	0,707	1,225	$\sqrt{2} = 1,414$	60
0010001	ЛЭПВ	45	15	-45	2	1,225	0,707	1,414	30
0010010	ЛЭПВ	45	30	45	2	0,366	1,366	1,414	75
0010011	ЛЭПВ	45	30	-45	2	1,366	0,366	1,414	15
0010100	ЛЭПВ	55	15	45	3,162	0,765	2,101	$\sqrt{5} = 2,236$	70
0010101	ЛЭПВ	55	15	-45	3,162	1,713	1,437	2,236	40
0010110	ЛЭПВ	55	30	45	3,162	0,195	2,227	2,236	85
0010111	ЛЭПВ	55	30	-45	3,162	2,026	0,945	2,236	25
0011000	ЛЭПВ	35	15	45	4,472	2,033	2,422	$\sqrt{10} = 3,162$	50
0011001	ЛЭПВ	35	15	-45	4,472	2,971	1,082	3,162	20
0011010	ЛЭПВ	35	30	45	4,472	1,336	2,866	3,162	65
0011011	ЛЭПВ	35	30	-45	4,472	3,150	0,276	3,162	5
0011100	ЛЭПВ	45	15	45	6	2,121	3,674	$\sqrt{18} = 4,243$	60
0011101	ЛЭПВ	45	15	-45	6	3,674	2,121	4,243	30
0011110	ЛЭПВ	45	30	45	6	1,098	4,098	4,243	75
0011111	ЛЭПВ	45	30	-45	6	4,098	1,098	4,243	15

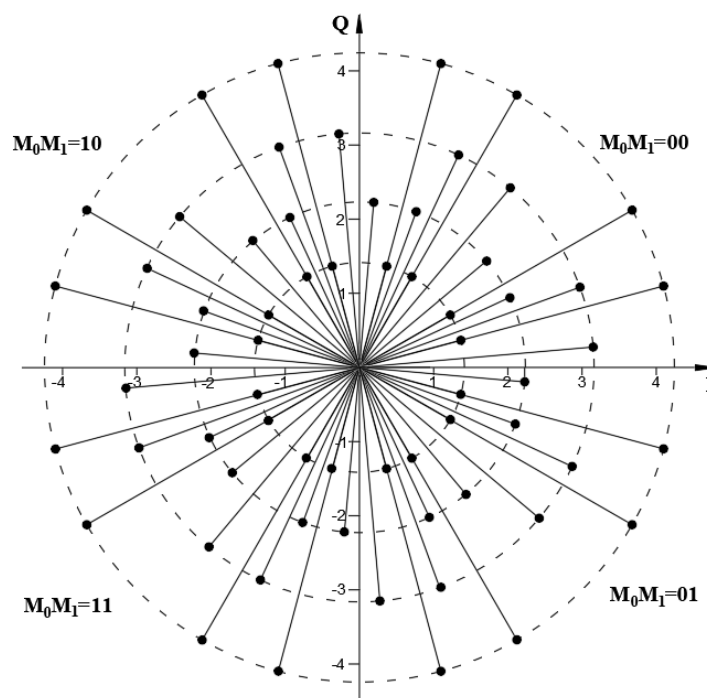


Рис. 2. Сигнальное созвездие 128-КАПМ радиосигнала
Fig. 2. Signal constellation 128-QAPM of the radio signal

На рис. 2 представлено сигнальное созвездие 128-КАПМ радиосигнала. Важно отметить, что в зависимости от применяемой поляризации (ПЭПВ или ЛЭПВ) одной точке в сигнальном созвездии соответствуют два сигнала с разными модуляционными символами. Обозначение M_0M_1 на рис. 2 соответствует двум старшим разрядам цифрового кода модуляционного символа.

Сигнальное созвездие 128-КАПМ радиосигнала имеет 4 уровня амплитудных значений и 48 значений фаз. По сути, это сигнальное созвездие представляет собой объединение сигнальных созвездий двух видов цифровой модуляции: квадратурной амплитудной манипуляции (КАМ) (в рамках отдельного квадранта) и квадратурной фазовой манипуляции (КФМ) (в рамках отдельного амплитудного уровня).

Подытожим основные положения метода 128-КАПМ:

- для передачи цифровой информации используется эллиптически поляризованная электромагнитная волна с определенным видом поляризации и с управляемыми значениями амплитуды, начальной фазы, гео-

метрическими параметрами эллипса поляризации;

- применяется вид цифровой модуляции: 128-позиционная квадратурная амплитудно-поляризационная манипуляция; модуляционный символ состоит из 7-разрядного цифрового кода;
- выделение квадратурных составляющих синтезируемого сигнала (6) происходит согласно формулам (12) при заданных значениях A , α , β и φ ;
- по формулам пересчета (3) сигнал преобразуется в две волны круговой поляризации и излучается в пространство.

На рис. 3 представлена структурная схема КАПМ-модулятора.

Последовательность двоичных символов $x_0, x_1, x_2, \dots$, которую требуется передать по каналу связи, подается на ППК – последовательно-параллельный кодер. Здесь двоичные символы группируются в модуляционные символы по N бит. В ФКС – в формирователе кодовых символов, – согласно табл. 2, вычисляются цифровые значения синфазной I_k и квадратурной составляющих Q_k с учетом поляризации, значений амплитуды A , начальной

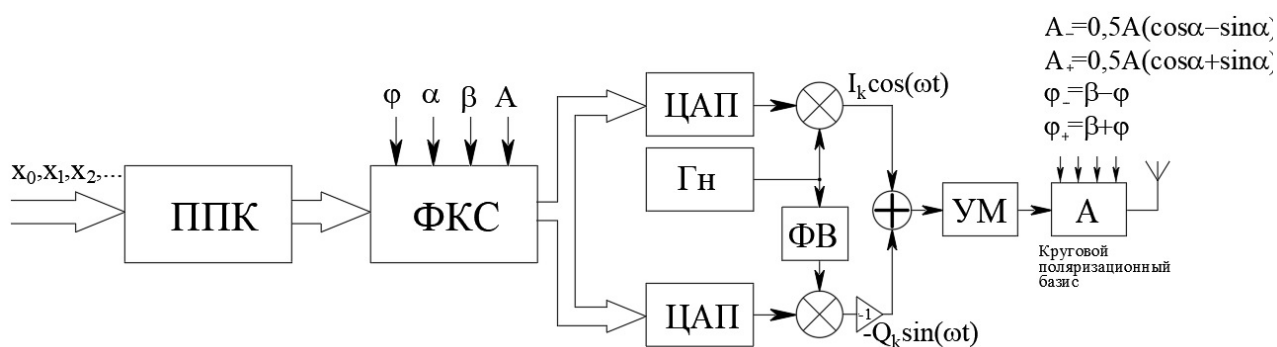


Рис. 3. Структурная схема КАПМ-модулятора
Fig.3. Block diagram of the QAPM modulator

фазы φ , угла эллиптичности α и угла ориентации эллипса поляризации β , которые соответствуют поступившему модуляционному N -разрядному символу. Далее по двум квадратурным каналам цифровой код поступает в ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, где переводится в аналоговую форму. Аналоговый сигнал в обоих каналах поступает на один вход умножителя. На второй вход умножителя синфазного канала поступает сигнал с Гн – гетеродина, а на второй вход умножителя квадратурного канала сигнал с гетеродина проходит через ФВ – фазовращатель на 90° [16–21]. Далее согласно формуле (6) формируется КАПМ-сигнал, который поступает на УМ – усилитель мощности и в А – антенную систему. В антенной системе КАПМ сигнал по формулам пересчета (3) преобразуется в две волны круговой поляризации с противоположным направлением вращения вектора $\vec{E}$ и имеющих относительный сдвиг фаз и различные амплитуды для излучения в пространство.

Заключение

В настоящее время вопросы эффективности применения поляризационно-манипулированных сигналов и методов их обработки для решения многих практических задач не вызывает сомнения у радиоспециалистов. В данной статье описан 128-позиционный метод квадратурной амплитудно-поляризационной манипуляции, применяемый для пе-

редачи цифровой информации. Математическое моделирование сигнального созвездия при 128-КАПМ показало, что по сути квадратурная амплитудно-поляризационная манипуляция объединяет в себе другие, повсеместно применяемые в телекоммуникационных системах, виды цифровой модуляции. Квадратурную амплитудно-поляризационную манипуляцию можно рассматривать как универсальный вид цифровой модуляции, где можно применить одновременно все преимущества квадратурной амплитудной манипуляции и квадратурной фазовой манипуляции. В этом заключается практическая значимость данной работы.

Список литературы

1. Егоров Е.И., Калашников Н.И., Михайлов А.С. Использование радиочастотного спектра и радиопомехи. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
2. Яманов Д.Н., Жаворонков С.С. Многопозиционные сигналы с поляризационной манипуляцией // Научный Вестник МГТУ ГА. 2007. № 112. С. 52–56.
3. Гусев К.Г., Филатов А.Д., Сополев А.П. Поляризационная модуляция. М.: Советское радио, 1974. 288 с.
4. Поповский В.В. Особенности использования поляризации и поляризационно-временных методов обработки сигналов в системах связи // Средства связи. 1982. № 21. С. 5–12.

5. Родимов А.П. Поляризационные методы обработки радиосигналов / А.П. Родимов, В.В. Поповский, В.И. Дмитриев, В.В. Никитченко // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 4. С. 38–48.

6. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция. Харьков: ХВКИУ, 1968. 328 с.

7. Chu T.S. Analysis and prediction of cross-polarization on earth-space links // Annales des Télécommunications. 1981. Vol. 36. Pp. 140–147. DOI: 10.1007/BF02997017

8. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Поляризационная структура радиолокационных сигналов: монография. М.: Радиотехника, 2005. 704 с.

9. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.

10. Вагапов Р.Х. Дистанционные методы исследования морских льдов / Р.Х. Вагапов, В.П. Гаврило, А.И. Козлов, Г.А. Лебедев, А.И. Логвин. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 341 с.

11. Курдюмов О.А., Сагач В.Е. Антенны эллиптической поляризации в спутниковой навигации и телеметрии. М.: Радиотехника, 2018. 160 с.

12. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2018. 452 с.

13. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.

14. Bertsekas D., Tsitsilis J. Introduction to probability. 2nd ed. MA, Belmont: Athena Scientific, 2008. 544 p.

15. Gray R.M., Davidson L.D. Introduction to statistical signal processing. Cambridge University Press, 2004. 463 p.

16. Корнеев П.Е. Дискретизация поляризованного сигнала // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 3. С. 169–177. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-169-177

17. Гадзиковский В.И. Цифровая обработка сигналов. М.: Солон-Пресс, 2013. 769 с.

18. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.

19. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. 3-е изд., испр. / Пер. с англ. под ред. С.Ф. Боева. М.: Техносфера, 2012. 1048 с.

20. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. 3-е изд. М.: Высшая школа, 2000. 462 с.

21. Bellanger M. Digital processing of signals: Theory and practice. 3rd ed. New York: Wiley, 2000. 456 p.

References

1. Egorov, E.I., Kalashnikov, N.I. & Mihaylov, A.S. (1986). [Use of the radio frequency spectrum and radio interference]. Moscow: Radio i svyaz, 304 p. (in Russian)

2. Jamanov, D.N. & Zhavoronkov, S.S. (2007). Multilevel signals with polarization shift keying. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 112, pp. 52–56. (in Russian)

3. Gusev, K.G., Filatov, A.D. & Soplev, A.P. (1974). [Polarization modulation]. Moscow: Sovetskoye radio, 288 p. (in Russian)

4. Popovskiy, V.V. (1982). [Features of the use of polarization and polarization-time methods of signal processing in communication systems]. Sredstva svyazi, no. 21, pp. 5–12. (in Russian)

5. Rodimov, A.P., Popovskiy, V.V., Dmitriyev, V.I. & Nikitchenko, V.V. (1981). [Polarization methods of radio signal processing]. Zarubezhnaya radioelektronika, no. 4, pp. 38–48. (in Russian)

6. Gusev, K.G. (1968). [Polarization modulation]. Kharkiv: KhVKIU, 328 p. (in Russian)

7. Chu, T.S. (1981). Analysis and prediction of cross-polarization on earth-space links. Annales des Télécommunications, vol. 36, pp. 140–147. DOI: 10.1007/BF02997017

8. Kozlov, A.I., Logvin, A.I. & Sarychev, V.A. (2005). [Polarization of radio waves. Polarization structure of radar signals:

monography]. Moscow: Radiotekhnika, 704 p. (in Russian)

9. **Korostelev, A.A.** (1987). [*Space-time theory of radio systems*]. Moscow: Radio i svyaz, 320 p. (in Russian)

10. **Vagapov, R.Kh., Gavrilov, V.P., Kozlov, A.I., Lebedev, G.A. & Logvin, A.I.** (1993). [*Remote methods of sea ice research*]. St.Petersburg: Gidrometeoizdat, 341 p. (in Russian)

11. **Kurdyumov, O.A. & Sagach, V.E.** (2018). [*Elliptical polarization antennas in satellite navigation and telemetry*]. Moscow: Radiotekhnika, 160 p. (in Russian)

12. **Golikov, A.M.** (2018). [*Modulation, coding and modeling in telecommunication systems: Tutorial*]. St.Petersburg: Lan, 452 p. (in Russian)

13. **Sklar, B.** (2001). *Digital communications: fundamentals and applications*. 2nd ed. Publisher: Prentice Hall, 1079 p.

14. **Bertsekas, D. & Tsitsilis, J.** (2008). *Introduction to probability*. 2nd ed. Belmont, MA, Athena Scientific, 544 p.

15. **Gray, R.M. & Davidson, L.D.** (2004). *Introduction to statistical signal processing*. Cambridge University Press, 463 p.

16. **Korneev, P.E.** (2018). *The discretization of the polarized signal*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 3, pp. 169–177. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-169-177 (in Russian)

17. **Gadzikovskiy, V.I.** (2013). [*Processing of a digital signal*]. Moscow: Solon-Press, 769 p. (in Russian)

18. **Sergiyenko, A.B.** (2011). [*Processing of a digital signal: Tutorial*]. 3rd ed. St.Petersburg: BKhV-Peterburg, 768 p. (in Russian)

19. **Oppenheim, A.V. & Schaffer, R.W.** (1975). *Digital signal processing*. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 585 p.

20. **Baskakov, S.I.** (2000). [*Radio circuits and signals*]. 3rd ed. Moscow: Vysshaya shkola, 462 p. (in Russian)

21. **Bellanger, M.** (2000). *Digital processing of signals: Theory and practice*. 3rd ed. New York, Wiley, 456 p.

Сведения об авторе

Корнеев Павел Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий автоматизированного производства, ЕТИ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»», paul-korn@yandex.ru.

Information about the author

Pavel E. Korneev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Manufacturing Automation Technologies Chair, YTI (branch), FSFEI HE Moscow State Technological University “STANKIN”, paul-korn@yandex.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

05.07.2022
22.09.2022

Received
Accepted for publication

05.07.2022
22.09.2022