

УДК 621.376.6

# МОДЕЛЬ КАМ-СИГНАЛУ З ПЕРЕКОМУТАЦІЄЮ СКЛАДОВИХ ЧАСТОТИ-НОСІЯ

*Розроблено математичну модель КАМ-сигналу з використанням миттєвої фази як додаткового інформаційного параметру і проведення її змін за рахунок перекомутації складових частоти-носія. Проведено моделювання розробленої моделі на ЕОМ.*

*Ключові слова: КАМ, телекомунікації, фаза, завадостійкість, інформація.*

*Разработана математическая модель КАМ-сигнала с использованием мгновенной фазы в качестве дополнительного информационного параметра и проведение ее изменений за счет перекоммутации составляющих несущей частоты. Проведено моделирование разработанной модели на ЭВМ.*

*Ключевые слова: КАМ, телекоммуникации, фаза, помехоустойчивость, информация.*

*The mathematical model of QAM-signal with use the instantaneous phase as an additional information parameter and conducting its changes by overcommutation of carrier components is proposed. A computer simulation of the proposed mathematical model is performed.*

*Keywords: QAM, telecommunication, phase, noise immunity, information.*

**А. А. Овчарук**

Магістрант\*

Контактний тел.: (0432) 69-13-78

E-mail: pendalf2008@inbox.ru

**С. Т. Барась**

Кандидат технічних наук, доцент, декан\*

Контактний тел.: (0432) 598538

E-mail: penalf2008@mail.ru

**Т. І. Овчарук**

Магістрант

Кафедра проектування медико-біологічної апаратури\*\*

Контактний тел.: (0432) 435768

E-mail: evaforlife@mail.ru

\* Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури\*\*

\*\* Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021

## 1. Вступ

Кількість інформації, що передається у сучасних телекомунікаційних системах постійно зростає, що потребує підвищення швидкості передачі інформації. Одним із шляхів досягнення високої швидкості передачі інформації є використання квадратурної амплітудної модуляції (КАМ).

Традиційним підходом для підвищення швидкості передачі інформації на основі використання КАМ вважається збільшення кількості рівнів амплітуди і початкової фази сигналу та встановлення такого співвідношення сигнал/шум, при якому кількість помилок є допустимою [1].

Враховуючи те, що збільшення рівнів сигналу призводить до зростання міжрівневих спотворень, а, отже, і до збільшення кількості помилок, у роботах [2, 3, 4] було запропоновано альтернативні методи підвищення швидкості передачі інформації на основі КАМ. При цьому у роботах [2, 3] було розроблено моделі сигналів на основі запропонованих методів і проведено їх моделювання на ЕОМ, з результатів якого було виявлено, що дані методи дозволяють досягти кращої завадостійкості ніж використання традиційного методу підвищення швидкості передачі інформації на основі КАМ.

У роботі [4] було запропоновано варіант КАМ-сигналу, в якому миттєва фаза використовується як додатковий інформаційний параметр, а її зміна забезпечується

за рахунок перекомутації складових частоти-носія. Але оцінки впливу таких модифікацій КАМ-сигналу на завадостійкість у роботі [4] проведено не було.

## 2. Постановка завдання

Метою даного дослідження є розробка математичної моделі КАМ-сигналу, в якому миттєва фаза використовується як додатковий інформаційний параметр, і її зміна забезпечується за рахунок перекомутації складових частоти-носія, а також визначення впливу введення додаткового інформаційного параметру на завадозахищеність сигналу.

## 3. Методика проведення досліджень

Звичайний КАМ-сигнал можна представити формулою [1, 6]:

$$Z_m(t) = I_m \cdot \cos(2\pi f_c t) + Q_m \cdot \sin(2\pi f_c t), \quad (1)$$

де  $I_m$ ,  $Q_m$  — синфазний і квадратурний модулюючі імпульси;  $f_c$  — частота-носія;  $t$  — час, змінюється в діапазоні  $\{(m-1) \cdot T_{im} \dots m \cdot T_{im}\}$ ;  $m = 1, 2, \dots, N_{im}$  — порядковий номер модулюючого імпульсу;  $T_{im}$  — період модулюючого

сигналу;  $\cos(2\pi f_c t)$  — синфазна складова частоти-носія;  $\sin(2\pi f_c t)$  — квадратурна складова частоти-носія;  $N_{im}$  — кількість модулюючих імпульсів.

Демодуляція КАМ-сигналу відбувається відповідно до формул [7]:

$$y_I(t) = Z_m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) = \frac{I_m}{2} + \frac{I_m}{2} \cdot \cos(4\pi f_c t) + \frac{Q_m}{2} \cdot \sin(4\pi f_c t); \quad (2)$$

$$y_Q(t) = Z_m(t) \cdot \sin(2\pi f_c t) = \frac{Q_m}{2} + \frac{Q_m}{2} \cdot \cos(4\pi f_c t) + \frac{I_m}{2} \cdot \sin(4\pi f_c t). \quad (3)$$

Після демодуляції відбувається низькочастотна фільтрація сигналів  $y_I(t)$  та  $y_Q(t)$ , в результаті чого виділяються корисні складові  $Q'_m$  та  $I'_m$ :

$$Q'_m = \frac{Q_m}{2}; \quad (4)$$

$$I'_m = \frac{I_m}{2}. \quad (5)$$

Модифікований КАМ-сигнал, який створюється на основі методу підвищення швидкості передачі інформації з використанням миттєвої фази сигналу як додаткового інформаційного параметру позначимо як КАМФ [2, 4]. При цьому, якщо відбувається модифікація сигналу КАМ-16 (16 рівнів амплітуди і початкової фази) будемо позначати модифікований сигнал аналогічно — КАМФ-16.

Якщо вузол «сузір'я» КАМ [6] знаходиться у 2-й чи 4-й чвертях (табл. 1), то завдяки проведенню перекомутації під час поточного модулюючого імпульсу можна передавати додаткові біти за рахунок зміни фази сигналу [4]. Тому якщо інформація рівномірно розподілена по всім чвертям, то на кожні 4 імпульси модулюючого сигналу в середньому буде передаватись 2 додаткові біти (при використанні 1-ї перекомутації) [4], тобто кількість додаткових бітів на 1 модулюючий імпульс буде дорівнювати 0,5.

Таблиця 1

Зміна положення вузла «сузір'я» внаслідок перекомутації синфазної і квадратурної складових частоти-носія

№	$I_m$	$Q_m$	Чверть до перекомутації	Чверть після перекомутації
1	< 0	< 0	3	3
2	< 0	> 0	2	4
3	> 0	< 0	4	2
4	> 0	> 0	1	1

Демодуляція сигналу КАМФ відбувається за принципом, аналогічним до демодуляції сигналу КАМ. Якщо розглядати часове представлення такого демодульованого сигналу (рис. 1), то можна побачити, що в результаті перекомутації складових частоти-носія відбувається зміна полярності модулюючого імпульсу в другій його половині [4].

Як видно з рис. 1 демодульовані імпульси № 2, № 5, № 6 сигналу КАМФ (штрихова лінія) в першій своїй по-

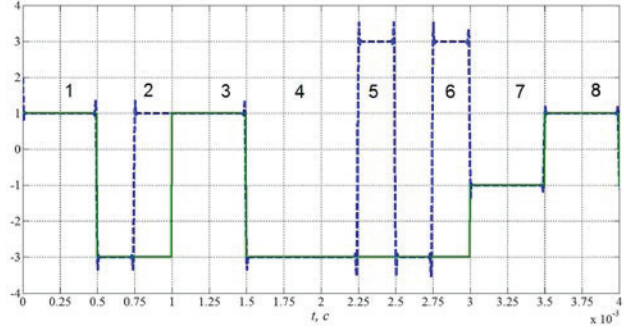


Рис. 1. Часове представлення модулюючого сигналу (суцільна лінія) та демодульованого сигналу КАМФ (штрихова лінія)

ловині мають від'ємну полярність, а в другій — додатну, що обумовлюється зміщенням фази частоти-носія на  $\pi$  (рад). Таким чином відмінність демодуляції КАМФ від КАМ полягає у необхідності сприймати кожен демодульований імпульс як такий, що складається з двох імпульсів-половинок: перший з них несе у собі інформацію про амплітуду модулюючого сигналу, а другий — про додатковий біт, що передається. Порівнюючи полярність демодульованого сигналу КАМФ на проміжку часу до перекомутації з його ж полярністю на проміжку часу після перекомутації, можна зробити висновок про те, відбувалася перекомутація чи ні (рис. 2).

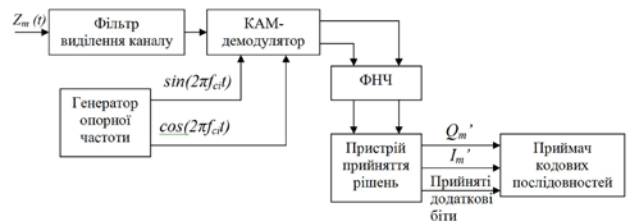


Рис. 2. Спрощена структурна схема приймача КАМФ-сигналу

Таким чином математична модель сигналу КАМФ може бути представлена наступним чином:

1) передавач:

- задаємо множину значень модулюючих імпульсів  $I_m$  та  $Q_m$ , а також множину значень додаткових бітів  $d_m$ ;
- визначаємо момент перекомутації  $t_1$  [4];
- проводимо процес модуляції відповідно до формул:

$$I = \begin{cases} I_m \cdot \cos(2\pi f_c t), & \text{якщо } \frac{|Q_m|}{Q_m} = \frac{|I_m|}{I_m} \text{ або } d_m = 0; \\ \begin{bmatrix} I_m \cdot \cos(2\pi f_c t), & mT_{im} < t \leq (t_1 + mT_{im}); \\ I_m \cdot \sin(2\pi f_c t), & (t_1 + mT_{im}) < t \leq (m+1)T_{im}; \end{bmatrix}, & \text{якщо } \frac{|Q_m|}{Q_m} \neq \frac{|I_m|}{I_m} \text{ і } d_m = 1; \end{cases} \quad (6)$$

$$Q = \begin{cases} Q_m \cdot \sin(2\pi f_c t), & \text{якщо } \frac{|Q_m|}{Q_m} = \frac{|I_m|}{I_m} \text{ або } d_m = 0; \\ \begin{bmatrix} Q_m \cdot \sin(2\pi f_c t), & mT_{im} < t \leq (t_1 + mT_{im}); \\ Q_m \cdot \cos(2\pi f_c t), & (t_1 + mT_{im}) < t \leq (m+1)T_{im}; \end{bmatrix}, & \text{якщо } \frac{|Q_m|}{Q_m} \neq \frac{|I_m|}{I_m} \text{ і } d_m = 1; \end{cases}$$

$$Z_m(t) = I + Q.$$

2) приймач

- отримуємо сигнали  $y_I(t)$  та  $y_Q(t)$  за формулами (2) і (3);
- виділяємо демодульовані сигнали  $Q'_m$  та  $I'_m$  за допомогою пропускання через ФНЧ сигналів  $y_I(t)$  та  $y_Q(t)$ :

$$I'_m = \text{ФНЧ}(y_I(t)); Q'_m = \text{ФНЧ}(y_Q(t)). \quad (7)$$

■ виділяємо частину демодульованих імпульсів, яка відповідає проміжку часу до перекомутації:

$$\begin{aligned} I_{m,1\text{пол.}} &= I'_m, & mT_{\text{IM}} < t \leq (t_1 + mT_{\text{IM}}); \\ Q_{m,1\text{пол.}} &= Q'_m, & mT_{\text{IM}} < t \leq (t_1 + mT_{\text{IM}}). \end{aligned} \quad (8)$$

■ виділяємо частину демодульованих імпульсів, яка відповідає проміжку часу після перекомутації:

$$\begin{aligned} I_{m,2\text{пол.}} &= I'_m, & (t_1 + mT_{\text{IM}}) < t \leq (m+1)T_{\text{IM}}; \\ Q_{m,2\text{пол.}} &= Q'_m, & (t_1 + mT_{\text{IM}}) < t \leq (m+1)T_{\text{IM}}. \end{aligned} \quad (9)$$

■ приймаємо значення демодульованих імпульсів рівним подвоєнному значенню й половини:

$$\begin{aligned} I_m &= 2 \cdot I_{m,1\text{пол.}}; \\ Q_m &= 2 \cdot Q_{m,1\text{пол.}}. \end{aligned} \quad (10)$$

■ визначаємо значення додаткового біту (якщо він передався)

$$d'_m = \begin{cases} \emptyset, & \text{якщо } \frac{|Q'_m|}{Q'_m} = \frac{|I'_m|}{I'_m}; \\ 0, & \text{якщо } I_{m,1\text{пол.}} = I_{m,2\text{пол.}} \text{ і } Q'_{m,1\text{пол.}} = Q'_{m,2\text{пол.}}; \\ 1, & \text{якщо } I_{m,1\text{пол.}} \neq I_{m,2\text{пол.}} \text{ або } Q'_{m,1\text{пол.}} \neq Q'_{m,2\text{пол.}}. \end{cases} \quad (11)$$

#### 4. Моделювання

Моделювання проходить по алгоритму, зображеному на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм проведення моделювання

Модуляція сигналів здійснюється відповідно до системи (6). Фільтр каналу (рис. 3) забезпечує узгодження спектрального складу сигналу з спектром каналу. Фільтр каналу являє собою смуговий фільтр Чебишева 2-го роду 8-го порядку з частотами зрізу 62 (кГц) та 66 (кГц) і з подавленням сигналу поза смугою пропускання рівним 10 (дБ) (рис. 4).

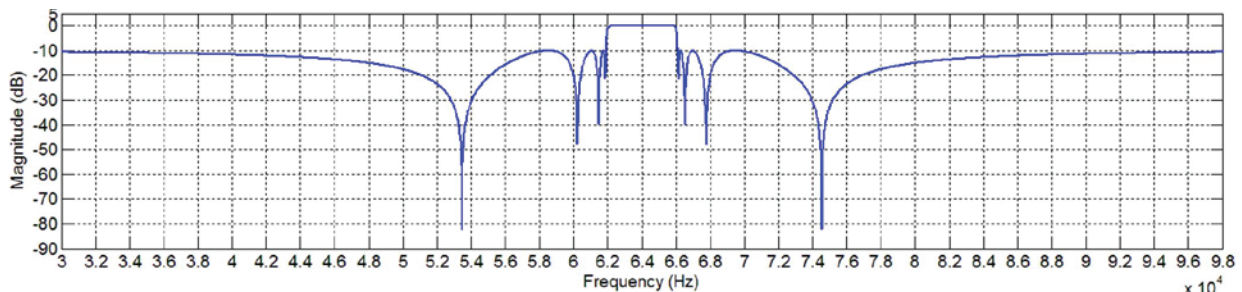


Рис. 4. АЧХ фільтру каналу

У каналі (рис. 3) на сигнали діє завада, яка являє собою адитивний білий гаусівський шум. Демодуляція сигналів (рис. 4) здійснюється відповідно до (2), (3), (7)–(11). У порівнюючому пристрої відбувається порівняння бітів, що передавалися каналом зв'язку з бітами, що були демодульовані.

На основі математичної моделі (6)–(11) побудуємо сигнал КАМФ-16 з наступними параметрами:

- значення частоти-носія  $f_c = 64$  (кГц);
- перекомутація синфазної та квадратурної частоти-носія відбувається в момент часу рівний половині тривалості модулюючого імпульсу

$$t_1 = 0,5 \cdot T_{\text{IM}}.$$

■ перекомутація може відбуватися лише якщо вузол «сузір'я» утворений основними бітами, що передаються в даному модулюючому імпульсі, лежить в 2-й або 4-й чвертях;

■ перекомутація відбувається, якщо додатково передається «1» і не відбувається, якщо передається «0»;

■ частота модулюючого сигналу  $f_m = 2$  (кГц).

■ інформація рівномірно розподілена по всіх чвертях «сузір'я» КАМ;

■ кожен наступний імпульс модулюючого сигналу модулює значення частоти-носія з нульовою початковою фазою.

Отже у одному імпульсі сигналу КАМФ-16 буде передатись в середньому 0,5 додаткових біт інформації, а тому позначимо цей сигнал як КАМФ-16-0,5. Для того щоб оцінити завадостійкість сигналу КАМФ-16-0,5 проведемо також моделювання сигналу КАМ-16, на основі його моделі описаної у [7].

Для моделювання використаємо пакет прикладних програм Matlab [7]. Моделювання проведимо для різних значень співвідношення сигнал-шум snr (дБ).

Перш за все, для оцінки адекватності створеної в Matlab моделі сигналу КАМФ-16-0,5 варто розглянути спектральний склад частоти-носія, оскільки зрозуміло, що через використання перекомутації частота-носії повинна мати додаткові спектральні компоненти. На рис. 5 подано спектр синфазної складової частоти-носія сигналу КАМФ-16-0,5.

Як видно з рис. 5 спектр частоти-носія сигналу КАМФ містить додаткові спектральні компоненти, які впливатимуть на результати моделювання.

В табл. 2 наведено результати моделювання сигналів КАМ-16 та КАМФ-16-0,5.

На рис. 6 наведено графіки АЧХ сигналів КАМ-16 та КАМФ-16-0,5.

Адекватність моделі сигналу КАМ-16 побудованої у Matlab можна підтвердити порівнянням результатів моделювання з графіком наведеним у [8, с. 702]. Так як на

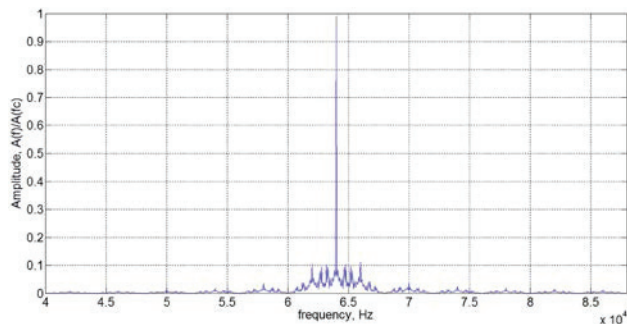


Рис. 5. Спектр синфазної складової частоти-носія сигналу КАМФ-16-0,5

Результати моделювання

snr (дБ)		14	16	18	20	22	24
Кількість переданих імпульсів		10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	2,5 · 10 <sup>8</sup>
КАМ-16	Кількість невірно прийнятих бітів	2140	720	85	65	20	2
	BER	5,4 · 10 <sup>-3</sup>	1,8 · 10 <sup>-3</sup>	2,1 · 10 <sup>-4</sup>	1,6 · 10 <sup>-5</sup>	5 · 10 <sup>-7</sup>	2 · 10 <sup>-9</sup>
Кількість переданих імпульсів		10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>
КАМФ-16-0,5	Кількість невірно прийнятих бітів	2736	849	105	8	5	4
	BER	6,1 · 10 <sup>-3</sup>	1,9 · 10 <sup>-3</sup>	2,3 · 10 <sup>-4</sup>	1,8 · 10 <sup>-5</sup>	1,1 · 10 <sup>-6</sup>	8,9 · 10 <sup>-8</sup>
Відношення BER КАМФ-16-0,5 до BER КАМ-16		1,13	1,05	1,1	1,13	2,2	44,5

програмному рівні модель КАМФ-16-0,5 у Matlab написана на основі моделі КАМ-16 з урахуванням розробленої в даній статті математичної моделі (2), (3), (6)–(11), та спираючись на рис. 6 можна стверджувати адекватність моделі КАМФ-16-0,5.

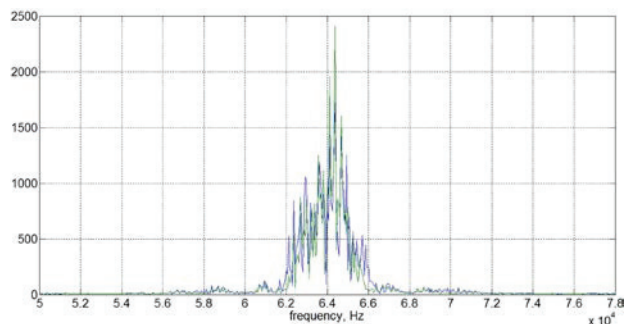


Рис. 6. Графік спектральної щільності потужності КАМФ-16-0,5 (суцільна лінія) та КАМ-16 (точкова лінія)

В результаті проведеного моделювання можна зробити наступні висновки:

1. Швидкість передачі інформації сигналом КАМФ більша за швидкість передачі інформації сигналом КАМ на:

$$\Delta V (\%) = \frac{h}{N} \cdot L (\%) = \frac{1}{4} \cdot 50 \% = 12,5 (\%),$$

де  $h$  — кількість перекомутацій частоти носія в одному модулюючому імпульсі;  $N$  — кількість основних бітів, що передаються у кожному символі;  $L (\%)$  — статистична кількість інформації, що припадає на 2 і 4 частоти «сузір'я» КАМФ у відсотках.

2. Спектри сигналів КАМ-16 та КАМФ-16-0,5 (див. рис. 6) зосереджені в діапазоні 62–66 (кГц), що забезпечується фільтром каналу.

3. Відношення BER КАМФ-16-0,5 до BER КАМ-16 зберігається приблизно рівним 1 в діапазоні snr (дБ) від 14 до 16 (дБ). Значним це відношення стає лише при snr (дБ) = 24 (дБ), де воно рівне 44,5. Отже завадостійкість сигналу КАМФ-16-0,5 співрозмірна з завадостійкістю КАМ-16.

Таблиця 2

5. Висновки

Узагальнюючі і аналізуючи все вище сказана можна зробити наступні висновки:

1. Розроблена математична модель сигналу КАМ, у якому миттєва фаза використовується як додатковий інформаційний параметр, а її зміни відбуваються за рахунок перекомутації складових частоти-носія;

2. Представлена на рис. 2 схема приймача КАМФ структурно не відрізняється від приймача КАМ, відмінності проявляються лише на програмному рівні (у необхідності обробки демодульованого імпульсу частинами).

3. Враховуючи результати моделювання, можна стверджувати, що сигнал КАМФ-16-0,5 не призводить до

розширення спектру сигналу, має вищу швидкість передачі інформації ніж КАМ-16 і порівняно співвідносне з КАМ-16 значення BER. При цьому кількість необхідних схемотехнічних змін обмежується необхідністю введення блоку перекомутації складових частоти-носія у передавачі [4].

Таким чином, розроблена математична модель та проведене моделювання підтверджують ефективність запропонованого у [4] методу підвищення швидкості передачі інформації на основі КАМ з використанням миттєвої фази сигналу як додаткового інформаційного параметра, при зміні значення миттєвої фази шляхом перекомутації складових частоти-носія під час існування поточного модулюючого імпульсу.

Література

1. Голуб В. С. Квадратурные модуляторы и демодуляторы в системах радиосвязи [Текст] / В. С. Голуб // Электроника: НТБ: науч.-техн. жур. — 2003. — № 3. — С. 28–32.
2. Барась С. Т. Підвищення швидкості передачі інформації на основі використання алгоритму квадратурної амплітудної модуляції [Текст] / С. Т. Барась, А. А. Овчарук, Т. І. Овчарук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2010. — № 2. — С. 242–249.



3. Овчарук А. А. Квадратурна амплітудна модуляція зі змінним значенням частоти-носія [Текст] / А. А. Овчарук, С. Т. Барась, Т. І. Овчарук // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2011. — № 4. — С. 47–51.
4. Овчарук А. А. Оптимізація алгоритму квадратурної амплітудної модуляції [Текст] / А. А. Овчарук, С. Т. Барась // Вісник Хмельницького національного університету. — 2010. — № 4. — С. 196–200.
5. Коханов А. Б. Способ модуляции-демодуляции сигналов с квадратурным изменением угловой компоненты [Текст] / А. Б. Коханов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре: науч.-техн. жур. — 2006. — № 4. — С. 9–13.
6. Бакланов И. Г. Технология ADSL/ADSL2+ теория и практика применения [Текст] / И. Г. Бакланов. — М.: Метротек, 2007. — 384 с.
7. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко. — СПб.: Питер, 2002. — 608 с.
8. Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems, 2-nd Edition [Текст] / L. Hanzo, S. X. Ng, T. Keller, W. T. Webb. — Wiley-IEEE Press, 2004. — 1036 p.

*Розглянуті методи дискретизації в тривимірних областях. Описані прямі і ітераційні методи, а так само метод побудований на еквідистантній сітці. Створений шаблон з високою точністю опису еквідистантної сітки.*

*Ключові слова: тривимірна область, сіткові методи, зображення.*

*Рассмотрены методы дискретизации в трехмерных областях. Описаны прямые и итерационные методы, а также метод построен на эквидистантной сетке. Создан шаблон с высокой точностью описания эквидистантной сетки.*

*Ключевые слова: трехмерная область, сеточные методы, изображение.*

*The methods of discretisation are considered in three-dimensional areas. Direct and iteration methods are described, and similarly a method is built on a akvidistation net. A template is created with high exactness of description of akvidistation net.*

*Keywords: three-dimensional area, net methods, image.*

УДК 004.93

## МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЕ СЕТОК В ТРЕХМЕРНЫХ ОБЛАСТЯХ

**Е. В. Ошаровская**

Кандидат технических наук, доцент  
Директор учебно-научного института радио, телевидения и электроники (УНИ РТЭ)\*

**Контактный тел.:** (048) 723-38-34, 067-793-23-04

**E-mail:** osharovskaya@mail.ru

**Н. А. Патлаенко**

Преподаватель кафедры телевидения и радиовещания (ТВ и РВ)\*

**Контактный тел.:** (048) 723-38-34, 098-937-28-84

**E-mail:** nick\_msa@ukr.net

**В. И. Солодка**

Преподаватель кафедры метрологии, стандартизации и сертификации (МСС)\*

**Контактный тел.:** (048) 723-38-34, 097-653-99-59

**E-mail:** valentinka\_1986\_@mail.ru

\* Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова, ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина, 65000

### 1. Введение

В настоящее время исследование трехмерных изображений приводит к большому количеству исследований. Трехмерные изображения используются в компьютерной графике и в объемном телевидении. В настоящее время для построения объемных объектов используются методы построения сеток в трехмерных областях [1]. В процессе построения сеток обычно применяют дискретизацию [2], так как любой многоугольник на плоскости можно разбить на непересекающиеся треугольники, что применимо и к трехмерным областям.

### 2. Классификация существующих методов исследований

В соответствии с существующей классификацией методов построения сеток в трехмерных областях, имеющей

значительный объем информации рассматриваются только — прямые, итерационные методы (см. табл. 1). Все методы дискретизации по принципу построения сеток делятся на две большие группы: прямые и итерационные.

В прямых методах дискретизации сетка строится за один этап, причем ее топология (иначе говоря, граф связей между узлами) и координаты всех узлов известны изначально. В итерационных методах сетка строится последовательно, на каждом шаге добавляется один или несколько элементов, причем изначально не известны ни координаты узлов, ни топология сетки. Кроме того, координаты узлов и топология могут меняться прямо в процессе построения.

Прямые методы делятся на две группы: методы на основе шаблонов и методы отображения.

Первый подразумевает разбиение областей заданного вида — параллелепипеда, шара, цилиндра, и т. д. Соответственно, для каждого вида области используется свой шаблон, т. е. принцип размещения узлов и установки связей