

УДК 621.396.2.018.424

В.Е. ЩЕРБАКОВ, К.А. ЛУКИН

*Институт радиопроизведения и электроники им. А.Я. Усикова НАНУ, Харьков, Украина***МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ/ПРИЕМА ДАННЫХ  
МЕЖДУ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ НА АВТОБАНЕ**

*В статье рассмотрены некоторые вопросы моделирования CARs-to-CARs системы, разрабатываемой для передачи данных в реальном масштабе времени между автомобилями, находящимися внутри автомагистрали в радиусе до 2-х километров. Представлены алгоритм построения модели CARs-to-CARs системы и ее структурная схема, включая тракт передачи и приема данных. Приведено аналитическое выражение энергетической эффективности CARs-to-CARs системы с учетом взаимного влияния разных систем друг на друга из-за «неидеальной» ортогональности используемых кодовых сигналов. Предложено решение проблемы «ближнего-дальнего» приема сигналов от разных CARs-to-CARs систем.*

**Ключевые слова:** автобан, транспортные средства, частотное и пространственно-кодовое разделение каналов, стандарт DSRC, уникальный хаотический код, мультиплексная система подвижной связи.

**Введение**

Некоторое время тому назад авторами данной статьи была высказана новая идея [1-2] и предложена новая концепция [3-5] построения мультиплексной системы связи между транспортными средствами на автобанах, позволяющая осуществить передачу/прием данных в реальном масштабе времени между автомобилями, находящимися на автобанах в радиусе до 2-х километров.

Основные характерные особенности предложенной концепции CARs-to-CARs системы состоят в следующем:

1. Концептуально CARs-to-CARs система разработана в рамках стандарта DSRC (Dedicated Short-Range Communications – специально выделенные коммуникации ближнего действия) и предложено нами методом мультиплексной передачи данных с множественным доступом, использующего *много-частотную несущую и пространственно-кодовое разделение каналов* (MC-S-CDMA).

2. Концепция системы также основана на применении разработанных нами *методов генерации широкополосных хаотических кодовых сигналов*, имеющих достаточно низкую спектральную плотность мощности излучения и малые уровни боковых выбросов их авто- и взаимокорреляционных функций.

3. *Ключевая идея* построения CARs-to-CARs системы состоит в том, чтобы в системе с кодовым разделением каналов *уникальный код* для каждого транспортного средства ассоциировать не с самим транспортным средством, а с его текущим положением на автобанах.

нием на автобанах.

4. Применение в CARs-to-CARs системе широкополосных хаотических кодовых сигналов делает возможным создание необходимого числа независимых каналов связи в пределах выделенного частотного диапазона. Эти кодовые сигналы предоставляют также потенциальную возможность организации системы передачи/приема данных *без выделения частотного или временного канала для каждого транспортного средства*, и выполнения приема данных на *беспоисковой основе*.

5. Взаимная синхронизация всех хаотических кодовых сигналов (ХСП-кодов) при осуществлении *синхронного режима* передачи данных обеспечивается с помощью сигналов GPS. Концепция предусматривает использование *дифференциальной системы GPS* совместно с системой панорамного наблюдения WAAS, которые дают возможность каждому транспортному средству на автобанах определять свое местоположение с точностью от нескольких метров до нескольких дециметров.

Иллюстрационные материалы особенностей концепции, подробно поясняющие авторскую идею и новый подход к построению CARs-to-CARs системы, а также ее основные технические характеристики приведены в работах [4-5]. Согласно этой концепции в настоящее время продолжают работы по проектированию CARs-to-CARs системы.

*Цель работы* – исследование возможности практической реализации концепции построения CARs-to-CARs системы и взаимодействия этих систем между собой на автобанах посредством моделирования как отдельных CARs-to-CARs систем,

так и всего тракта передачи/приема данных между автомобилями с учетом влияния многолучевого и множественного характера распространения радиоволн вдоль трассы автомагистрали и движения автомобилей по автобану.

## 1. Моделирование CARs-to-CARs системы

### 1.1. Задача моделирования CARs-to-CARs системы и требования, предъявляемые к моделированию CARs-to-CARs системы

Главной задачей моделирования CARs-to-CARs системы является уточнение основных положений концепции и характеристик системы передачи/приема данных между автомобилями на автобане и решение проблемных вопросов, возникающих в процессе разработки CARs-to-CARs системы, а именно:

1. Учет неточности определения координат местоположения CARs-to-CARs систем относительно друг друга.

2. Учет неточности взаимной синхронизации по времени излучения передатчиков разных CARs-to-CARs систем при осуществлении синхронного режима передачи данных.

3. Проблема «ближнего-дальнего» приема сигналов от разных CARs-to-CARs систем; выбор оптимального количества одновременно излучающих передатчиков вдоль одной полосы автобана.

4. Взаимное влияние разных CARs-to-CARs систем друг на друга из-за «неидеальной» ортогональности используемых кодовых сигналов.

5. Проблема «замирания» сигналов в точке приема вследствие многолучевого и множественного характера распространения сигналов.

6. Нестационарное поведение канала связи вследствие движения автомобилей по автобану.

Моделирование CARs-to-CARs системы и тракта передачи/приема данных должно быть выполнено в среде ПО MathCad с использованием бинарной формы представления кодовых сигналов. На первом этапе работы моделирование должно осуществляться без учета переноса спектра кодовых сигналов на СВЧ несущую частоту.

На этом этапе работы модель CARs-to-CARs системы должна включать следующие моменты моделирования, а именно:

1) формирование квазиортогональных кодовых сигналов на базе дискретного алгоритма генерации хаотического сигнала;

2) «привязку» кодовых сигналов к пространственным координатам системы на автобане;

3) формирование заданного количества передаваемых кодовых сигналов с учетом исходной информации, предназначенной для передачи;

4) вычисление взаимокорреляционной функции (ВКФ) принятых кодовых сигналов;

5) «оконную» обработку откликов ВКФ с целью выделения исходной информации;

6) сравнение исходной информации с сигналами, полученными в результате обработки откликов ВКФ.

Модель должна также учитывать:

1) дистанционное ослабление уровней передаваемых сигналов;

2) влияние теплового шума приемника на уровень флуктуаций откликов ВКФ;

3) влияние взаимных помех от разных кодовых сигналов на уровень флуктуаций откликов ВКФ

### 1.2. Алгоритм построения и структурная схема модели CARs-to-CARs системы

Ниже на рис. 1 и 2 представлены алгоритм построения модели CARs-to-CARs системы и структурная схема данной модели, включая тракт передачи/приема данных, которые соответствуют требованиям к моделированию системы по первому этапу работ.



Рис. 1. Алгоритм построения модели CARs-to-CARs системы

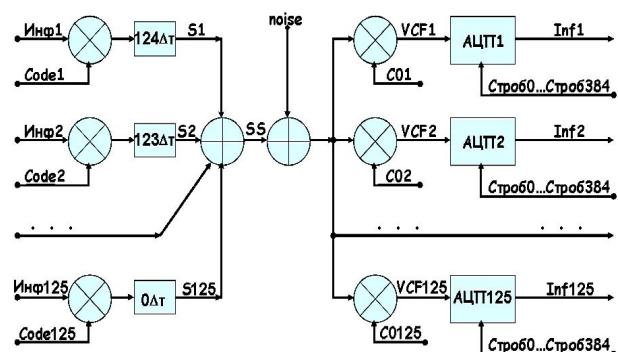


Рис. 2. Структурная схема модели CARs-to-CARs системы и тракта передачи/приема данных

**1.3. Формализация модели CARs-to-CARs системы и тракта передачи/приема данных**

Аналитическое выражение фазоманипулированного сигнала, использующего бинарный двоичный код, с учетом информационной модуляции имеет вид [7]

$$u(t) = U_0 \sum_{k=1}^L d_k \cdot \sum_{i=N(k-1)+1}^{Nk} x_i u_o [t - (i-1)\tau_3] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

где  $U_0$  – единичная функция;

$$\sum_{k=1}^L d_k \text{ – информационная последовательность,}$$

состоящая из  $L$  символов;

$$\sum_{i=N(k-1)+1}^{Nk} x_i u_o [t - (i-1)\tau_3] \text{ – модулирующая}$$

(расширяющая спектр) функция, в которой:

$x_i \in \{-1, +1\}$  – элементарные импульсы ХСП-кода;

$u_o(t)$  – единичная функция;

$\tau_3$  – длительность элементарного импульса (чипа) ХСП-кода;

$N$  – количество элементарных импульсов, приходящихся на один информационный сигнал (длина ХСП-кода).

Трансформируем это выражение применительно к нашей системе, преобразовав его к такому виду

$$u^{(n)} [(125-n)\Delta\tau, t] = U_0 \sum_{k=1}^L d_k^{(n)} \sum_{i=N(k-1)+1}^{Nk} x_i^{(n)} u_o [t - (i-1)\tau_3] \quad (2)$$

где  $n$  – номер используемого ХСП-кода (CDMA канала);

$$\Delta\tau = \frac{\Delta r}{c} \text{ – задержка, эквивалентная интервалу}$$

по дальности, равному  $\Delta r = 8\text{ м}$  ;

$(125-n)\Delta\tau$  – «привязка» ХСП-кодов к пространственным координатам системы на автобане.

Выражение для случая пространственного суммирования передаваемых кодовых сигналов с учетом дистанционного ослабления этих сигналов будет иметь вид

$$u_{\Sigma}(t) = \sum_{n=1}^{125} \gamma^{(n)} u^{(n)} [(125-n)\Delta\tau, t] \quad (3)$$

где  $\gamma^{(n)}$  – коэффициент дистанционного ослабления уровня сигнала для  $n$ -го кода.

Входной сигнал с учетом влияния теплового шума приемника можно записать в таком виде

$$U(t) = u_{\Sigma}(t) + \text{noise}(t) \quad (4)$$

где  $\text{noise}(t)$  – тепловой шум приемника:

$$\text{noise}(t) = \text{norm}(T, \mu, \sigma) \quad (5)$$

Вычисление взаимокорреляционной функции (VCF) для каждого из принимаемых кодовых сигналов будет выполнено согласно выражению

$$\text{VCF}_{\tau}^{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \text{code}_i^{(n)} U_{i+\tau} \quad (6)$$

где  $\text{code}_i^{(n)}$  – опорные ХСП-коды;

$N = 128$  – длина ХСП-кода;

$\tau = 0 \dots NL$  – временной интервал, на котором осуществляется вычисление VCF.

Цифровая «оконная» обработка откликов вычислителей взаимокорреляционной функции осуществляется согласно выражению

$$\text{INF}_i^{(n)} = \text{VCF}_{i \times 128 + (125-n)}^{(n)} \quad (7)$$

где  $n$  – номер используемого ХСП-кода;

$i = 0 \dots L-1$  – номер отклика VCF, который соответствует определенному символу информационной последовательности. В нашем случае принимаем  $L = 384$ .

**1.4. «Ближний-дальний» прием сигналов от разных CARs-to-CARs систем**

Суть проблемы «ближнего-дальнего» приема сигналов от разных CARs-to-CARs систем хорошо видна из приведенного рис. 3.

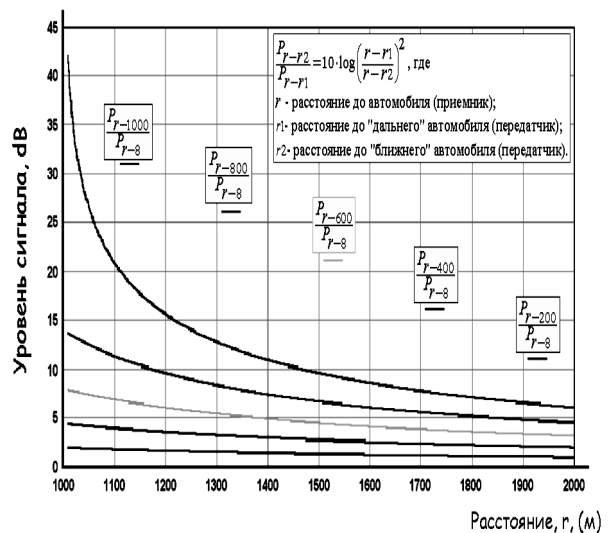


Рис. 3. «Ближний-дальний» прием сигналов от разных CARs-to-CARs систем

При соотношении  $\frac{r_2}{r_1} = 25$  (синяя кривая) различие в уровнях мощности сигналов от ближнего

и дальнего передатчиков не превышает  $\frac{P_{r-гБ}}{P_{r-гД}} \leq 3\text{дБ}$ .

При увеличении этого соотношения до  $\frac{r_2}{r_1} = 125$  (коричневая кривая) различие в уровнях мощности сигналов может достигать значений более  $\frac{P_{r-гБ}}{P_{r-гД}} > 40\text{дБ}$ .

### 1.5 Энергетическая эффективность CARs-to-CARs системы

Одной из важнейших метрик энергетической эффективности цифровой системы связи [6] является соотношение

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{S}{N} \left( \frac{W}{R} \right), \quad (8)$$

где  $E_b$  – энергия бита;

$N_o$  – спектральная плотность мощности шума;

$\frac{S}{N}$  – отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума;

$G_p = \frac{W}{R}$  – коэффициент расширения спектра сигнала;

$W$  – ширина полосы расширенного спектра сигнала, Гц;

$R$  – скорость передачи данных, бит/сек.

Средняя вероятность битовой ошибки в цифровой системе связи при наличии помех от интерференции между кодовыми сигналами [6] представлена в виде графиков на рис. 4.

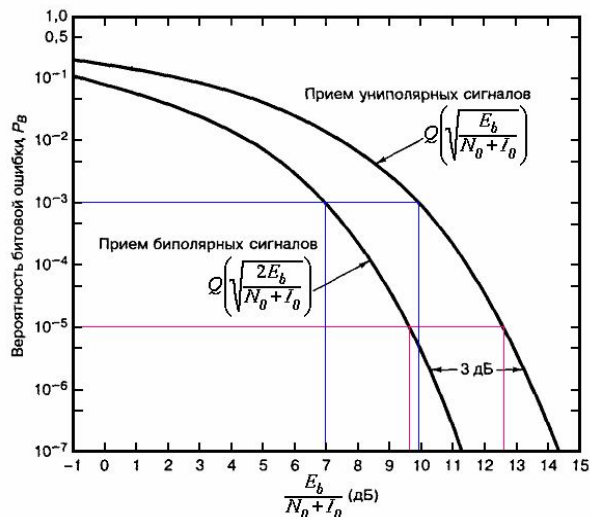


Рис. 4. Вероятность появления ошибочного бита при униполярной и биполярной передаче сигналов

Как видно из рисунка, при биполярной передаче сигналов для обеспечения приема бита с вероят-

ностью ошибки не более  $P_B = 10^{-3}$  необходимо выполнить соотношение

$$\frac{E_b}{N_o + I_o} \approx \frac{E_b}{I_o} \geq 7\text{дБ} \quad (\text{при } N_o \ll I_o), \quad (9)$$

где  $I_o$  – спектральная плотность мощности помех от интерференции между кодовыми сигналами.

Известно также [6], что максимально допустимое количество кодовых сигналов, которое может быть использовано в цифровой системе связи для обеспечения заданного уровня ошибок в первом приближении определяется по следующему выражению

$$(n_{\text{codes}})_{\text{max}} \leq \frac{G_p}{\left( \frac{E_b}{N_o + I_o} \right)}. \quad (10)$$

Применительно к нашему случаю

$$(n_{\text{codes}})_{\text{max}} \leq \frac{128}{5} \approx 25. \quad (11)$$

Аналитическое выражение энергетической эффективности цифровой системы связи, применительно к проектируемой CARs-to-CARs системе, легко трансформируется к виду

$$\left( \frac{E_b}{N_o + I_o} \right) (\text{дБ}) = \left( \frac{S}{N} \right)_{\text{прин}} (\text{дБ}) + \left( \frac{W}{R} \right) (\text{дБ}) - (I_{n_{\text{codes}}}) (\text{дБ}) - \left( \frac{P_{r-гБ}}{P_{r-гД}} \right) (\text{дБ}), \quad (12)$$

где  $I_{n_{\text{codes}}}$  – уровень взаимных помех от интерференции между ХСП-кодами;

$\frac{P_{r-гБ}}{P_{r-гД}}$  – степень изменения уровней мощности

сигналов от ближнего и дальнего передатчиков в точке приема для конкретного количества применяемых в CARs-to-CARs системе ХСП-кодов.

### 1.6 Влияние неточности определения координат местоположения CARs-to-CARs систем относительно друг друга. Влияние неточности взаимной синхронизации по времени излучения передатчиков разных CARs-to-CARs систем при осуществлении синхронного режима передачи данных

Согласно нашей концепции предусматривается использование системы DGPS совместно с системой WAAS, которые дают возможность каждому транспортному средству на автобане определять свое местоположение с точностью не хуже  $\sigma R = 1\text{м}$ ; при этом потенциальная ошибка времени синхронизации будет равна

$$\sigma t = \frac{\sigma R}{c} = 3,3\text{нс}. \quad (13)$$

А так как расчетная длительность элементарного импульса ХСП-кода равна  $\tau_p = 135\text{нс}$ , то потенциальная точность временной синхронизации ХСП-кодов будет не хуже

$$\chi = \frac{\sigma_t}{\tau_p} \cdot 100\% = 2,44\% . \quad (14)$$

Учитывая требования к синхронизации по времени излучения передатчиков разных CARs-to-CARs систем при осуществлении синхронного режима передачи информации, вычислим максимальные значения рассинхронизации как во времени, так и по пространственной координате соответственно:

$$\xi_t = \frac{\pm 3,3\text{нс}}{135\text{нс}} \cdot 100\% \approx \pm 2,5\% , \quad (15)$$

$$\xi_r = \frac{\pm (4\text{М} + 1\text{М})}{40,5\text{М}} \cdot 100\% \approx \pm 12,5\% , \quad (16)$$

а также максимально возможную их суммарную величину

$$\xi = \xi_t + \xi_r . \quad (17)$$

Таким образом, при обеспечении с помощью системы DGPS достаточно точного (не хуже  $\pm 1,0\text{м}$ ) определения своего местоположения относительно трассы автобана каждой CARs-to-CARs системой, а также учитывая максимально возможную пространственную (не более  $\pm 12,5\%$ ) и временную (не более  $\pm 2,5\%$ ) рассинхронизацию CARs-to-CARs систем относительно друг друга, получаем, что для декодирования принятой информации с требуемой достоверностью (вероятностью появления битовой ошибки не более  $10^{-3}$ ) допускается максимальная рассинхронизация кодовых последовательностей (ХСП-кодов) не более  $\pm 15\%$ .

На рис. 5 приведены эпюры флуктуаций отклика функции VCF и предельно допустимые зоны рассинхронизации кодовых последовательностей (ХСП-кодов) для случая воздействия на систему помех от максимального количества одновременно работающих CARs-to-CARs систем. Анализ этих функций подтверждает сделанные выше выводы.

### 1.7 Иллюстрация результатов моделирования CARs-to-CARs системы

Ниже на рис. 6, 7, 8 представлены эпюры работы модели CARs-to-CARs системы при воздействии на систему максимально допустимых значений уровней как шумов, так и помех, обусловленных взаимным влиянием разных CARs-to-CARs систем друг на друга из-за «неидеальной» ортогональности используемых кодовых сигналов.

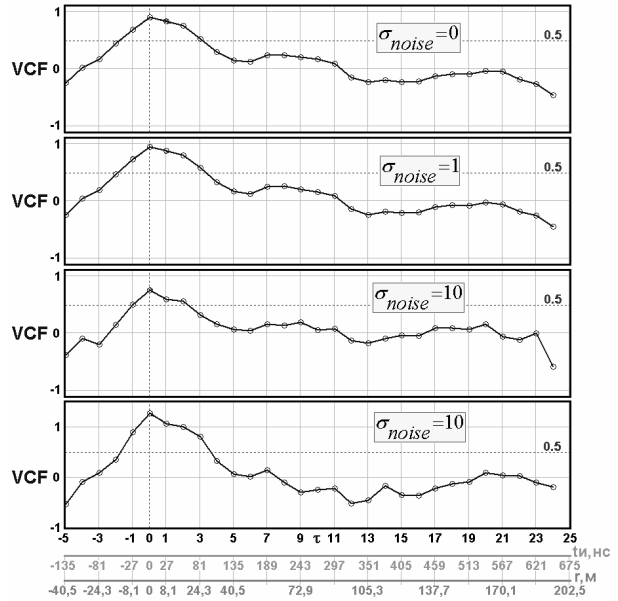


Рис. 5. Флуктуации отклика функции VCF при воздействии помех от максимального количества CARs-to-CARs систем ( $n_{\text{codes}} = 25$ )

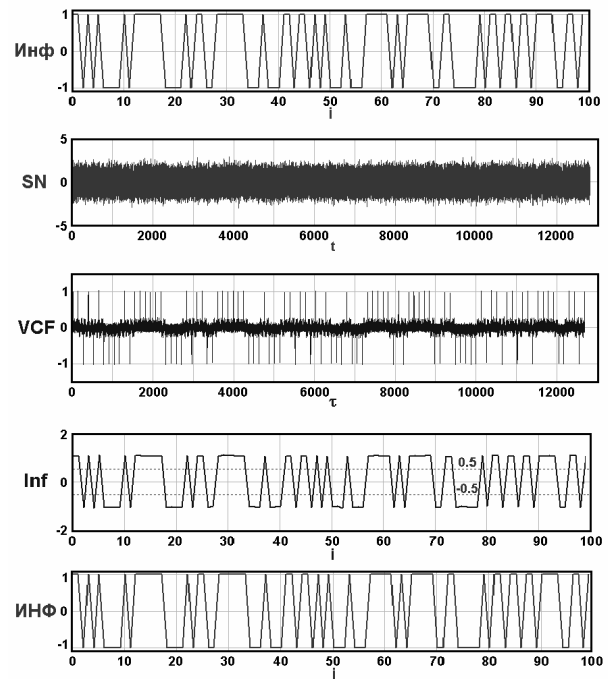


Рис. 6. Эпюры работы модели системы для случая:  $L = 100\text{бит}$ ;  $N = 128\text{чип}$ ;  $n_{\text{codes}} = 1$ ;  $\sigma_{\text{noise}} = 1$

### Выводы

Разработана модель CARs-to-CARs системы, которая позволяет уточнить некоторые характеристики и параметры системы передачи/приема данных между транспортными средствами на автобане. На достоверность декодирования принятой

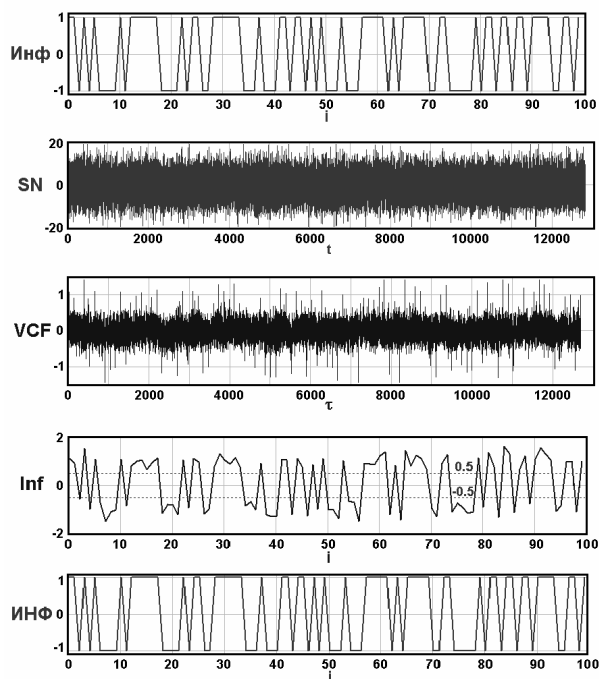


Рис. 7. Эпюры работы модели системы для случая:  
 $L = 100$ бит;  $N = 128$ чип;  $n_{\text{codes}} = 1$ ;  $\sigma_{\text{noise}} = 10$

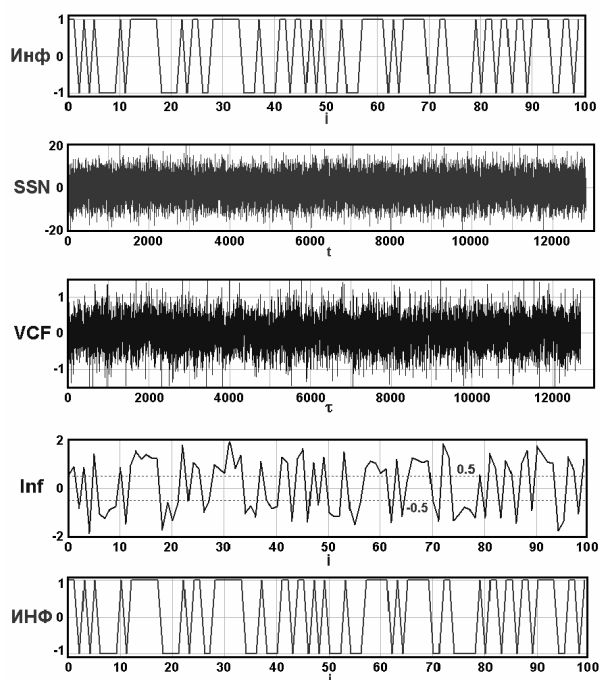


Рис. 8. Эпюры работы модели системы для случая:  
 $L = 100$ бит;  $N = 128$ чип;  $n_{\text{codes}} = 25$ ;  $\sigma_{\text{noise}} = 1$

информации (с вероятностью появления битовой ошибки не более  $10^{-3}$ ) не оказывают существенного влияния:

1) неточности пространственно-временной синхронизации систем не более  $\pm 15\%$ ;

2) тепловой шум приемника с уровнями мощности шума, которые соответствуют отношению  $c/\text{ш} = 0\text{дБ} \dots -20\text{дБ}$ ;

3) выбросы взаимных помех от кодовых сигналов разных систем, количество которых не превышает 25.

Дальнейшая работа по моделированию CARs-to-CARs системы должна быть продолжена для решения проблем построения системы, которые обусловлены как учетом влияния «замирания» сигнала в точке приема данных вследствие многолучевого и множественного характера распространения сигналов, так и анализом нестационарного поведения канала связи вследствие движения транспортных средств по автобану.

## Литература

1. Патент No.: US 6, 720, 920 B2, April 13, 2004.

2. Патент No.: US 7, 110, 880 B2, September 19, 2006.

3. Lukin K. *Dedicated Short-Range Communication System for Vehicle-to-Vehicle Data Transmission on the Basis of Chaotic Waveform codes (DSRC-VVDT)* / K. Lukin, V. Scherbakov, V. Kononov, R. Breed // *Proc. of 16 International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications – MIKON-2006. – Krakow, Poland. – May 22-24, 2006. – Vol. 1. – P. 442-445.*

4. Лукин К.А. *Метод построения самоорганизующейся системы связи между транспортными средствами на автобане* / К.А. Лукин, В.Е. Щербakov, В.М. Коновалов, Д.С. Бريد // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – №6 (25). – X.: XAI, 2007. – С. 238-244.*

5. Lukin K.A. *New Concept of Multiplex Broadband Wireless Communication for Vehicle-to-Vehicle Data Transmission on Highways* / K.A. Lukin, V.Ye. Scherbakov, V.M. Kononov, D.S. Breed. // *Proceeding of the Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves – MSMW'07. – Kharkov, Ukraine. – June 25-30, 2007. – Vol. 2. – P. 852-854.*

6. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд.* / Б. Скляр. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.

7. Клименко Н.Н. *Сигналы с расширением спектра в системах передачи информации* / Н.Н. Клименко, В.В. Кисель, А.И. Замарин // *Зарубежная радиоэлектроника. – 1983. – №11. – С. 45-59.*

Поступила в редакцию 03.02.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Б. Разказовский, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, Украина.

**МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ/ПРИЙОМУ ДАНИХ  
МІЖ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ НА АВТОБАНІ***В.Є. Щербаков, К.О. Лукін*

У статті розглянуто деякі питання моделювання CARs-to-CARs системи, що розробляється для передачі даних в реальному масштабі часу між автомобілями, що знаходяться усередині автомагістралі в радіусі до 2-х кілометрів. Представлено алгоритм побудови моделі CARs-to-CARs системи і її структурна схема, включаючи тракт передачі і прийому даних. Приведено аналітичний вираз енергетичній ефективності CARs-to-CARs системи з урахуванням взаємного впливу різних систем один на одного із-за «неідеальної» ортогональності використовуваних кодових сигналів. Запропоновано вирішення проблеми «ближнього-далекого» прийому сигналів від різних CARs-to-CARs систем.

**Ключові слова:** автобан, транспортні засоби, частотне і просторово-кодове розділення каналів, стандарт DSRC, унікальний хаотичний код, мультиплексна система рухомого зв'язку.

**THE MODELING OF SYSTEM FOR VEHICLE-TO-VEHICLE DATA  
TRANSMISSION/RECEPTION ON HIGHWAY***V. Ye. Scherbakov, K. A. Lukin*

Some questions of CARs-to-CARs system modeling developed for vehicle-to-vehicle data transmission on real-time within a highway area of 2 km in radius are considered in the article. Algorithm of model construction of CARs-to-CARs system and its block diagram, including the channel of data transmission/reception are presented. Analytical expression for energy efficiency of CARs-to-CARs system is resulted taking into account the interference of the different systems on each other from «non-perfect» orthogonality of in-use code signals. Problem solution of «near-far» reception of signals from different CARs-to-CARs systems is proposed.

**Keywords:** highway, vehicles, frequency and spatially-code demultiplexing, DSRC standard, unique chaotic code, multiplex mobile communication system.

**Щербаков Валерій Євгеньєвич** – вед. інженер отдела Інститута радіофізики и електроніки ім. А.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна, e-mail: scherbakov@ire.kharkov.ua.

**Лукін Константин Александрович** – д-р физ-мат. наук, проф., зав. отделом Інститута радіофізики и електроніки ім. А.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна, e-mail: lukin@ire.kharkov.ua.