

УДК 621.391.883.2

С.М. Первунінський, д-р техн. наук, проф.,
Р.М. Дідковський, канд. техн. наук, доц.,
Черкас. держ. технол. ун-т

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ ШУМОВОГО СИГНАЛУ

С.М. Первунінський, Р.М. Дідковський. Моделювання систем зв'язку з фазовою маніпуляцією шумового сигналу. Запропоновано методику моделювання системи, яка дозволяє дослідити вплив методів формування та обробки сигналу на надійність передачі даних. Модель каналу зв'язку враховує імпульсну характеристику каналу, можливість функціонування системи в одному частотному діапазоні з вузькополосними системами та наявність адитивного білого гауссового шуму.

Ключові слова: моделювання систем, імпульсна характеристика каналу, фазова маніпуляція шумового сигналу.

С.М. Первунинский, Р.М. Дидковский. Моделирование систем связи с фазовой манипуляцией шумового сигнала. Предложена методика моделирования системы, позволяющей исследовать влияние методов формирования и обработки сигнала на надежность передачи данных. Модель канала связи учитывает импульсную характеристику канала, возможность функционирования системы в одном частотном диапазоне с узкополосными системами и наличие аддитивного белого гауссового шума.

Ключевые слова: моделирование систем, импульсная характеристика канала, фазовая манипуляция шумового сигнала.

S.M. Pervuninsky, R.M. Didkovsky. Simulation of communication systems with phase-shift keying of noise signal. A method of system modeling, which allows studying the influence of signal forming and signal processing methods on data transfer reliability, is proposed. The communication channel model considers the channel impulse response, possibility of operating in common frequency range with narrow-band systems and the presence of additive white Gaussian noise.

Keywords: simulation of communication systems, channel impulse response, phase-shift keying of noise signal.

Система зв'язку з фазовою маніпуляцією шумового сигналу (ФМШС) відрізняється простотою структури передавального і приймального пристрою та найвищою в своєму класі систем потенційною завадостійкістю [1, 2]. Властивості системи в класичних гауссових каналах досить добре вивчені авторами [3, 4]. Однак, дослідження системи з ФМШС, оптимізація її структури та параметрів при функціонуванні в реальних каналах зв'язку є досить складним завданням.

Експериментальне розв'язання цього завдання вимагає значних витрат часу і матеріальних

ресурсів. Отже, актуальним є питання побудови математичної та обчислювальної імітаційної моделі системи зв'язку з ФМШС, яка би враховувала: особливості формування та обробки сигналу в системах з ФМШС, точність тактової синхронізації системи, не ідеальну імпульсну характеристику каналу, наявність у каналі квазігармонічних завад, вплив на сигнал адитивного білого гауссового шуму (БГШ).

Основні параметри системи, які має враховувати модель: одновимірний розподіл ймовірностей шумового сигналу, центральна частота та ширина спектра сигналу.

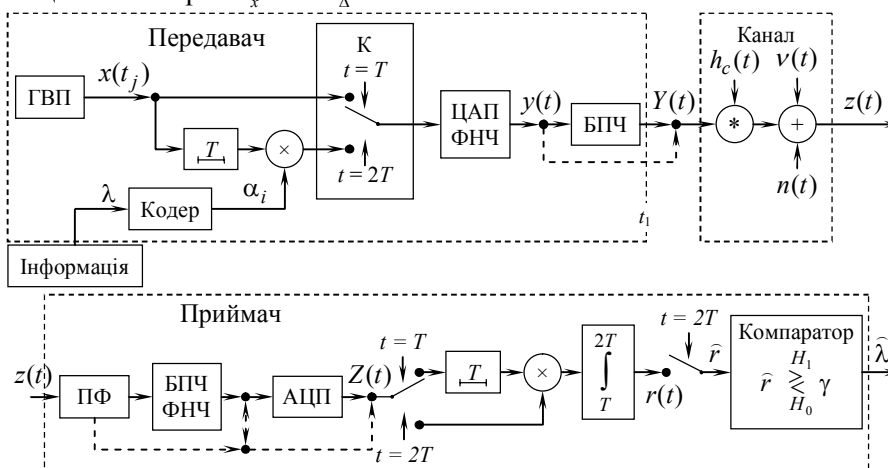
Структура системи, що підлягає моделюванню, зображена на рисунку.

Символьний інтервал T_s у системі з ФМШС складається з двох рівних за тривалістю частин $T = T_s / 2$. Протягом першої половини символного інтервалу $t \in [0, T)$ на вихід передавача надходить сигнал $x(t)$ безпосередньо з генератора шуму. Цей фрагмент символного інтервалу використовується як опорний сигнал. В момент часу $t = T$ комутатор К перемикається, і протягом наступної половини символного інтервалу $t \in [T, 2T)$ на вихід подається або дублікат опорного сигналу, або сигнал протилежний до нього (залежно від інформаційного символу λ , що передається в даний час).

Модель повністю відтворює роботу генератора шуму та модулятора у випадку їх цифрової реалізації.

Генератор випадкової послідовності (ГВП) в моменти часу t_j подає на вихід реалізацію $x_j = x(t_j)$ деякої випадкової величини з заданою функцією розподілу [4, 5]. Кожен відлік послідовності x_j формується незалежно від інших, математичне сподівання розподілу передбачається таким, що дорівнює нулю, а дисперсія σ_x^2 визначає потужність сигналу. Період слідування відліків позначимо t_Δ .

Протягом часу T отримаємо вектор $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{N_x})$ — опорний сигнал в цифровій формі. Розмірність цього вектора $N_x = T / t_\Delta$.



Структура системи зв'язку з ФМШС

Залежно від значення поточного інформаційного символу $\lambda = 0$ чи $\lambda = 1$ первинний цифровий сигнал на виході кодера набуває значень $\alpha_0 = -1$ або $\alpha_1 = 1$, відповідно. Тоді кортеж векторів $\bar{y} = (\bar{x}, \alpha_i \bar{x})$, $i = \overline{0,1}$ є цифровим представленням сигналу на символному інтервалі T_s .

Блок цифро-аналогового перетворення (ЦАП) та фільтр нижніх частот (ФНЧ) перетворюють вихід цифрового тракту передавача на аналоговий сигнал $y(t)$. Частота ЦАП має бути узгоджена з швидкістю роботи ГВП, тобто $f_{\Delta} = 1/t_{\Delta}$.

Моделювання блока відбувається шляхом застосування до вектора \bar{y} низькочастотного фільтра-інтерполятора з полосою пропускання $[0, F]$, де $F = f_{\Delta} / 2$. Результуючий вектор \tilde{y} представляє аналоговий сигнал $y(t)$ в моделі. Частота дискретизації цього сигналу $f_{\delta} = f_{\Delta} \cdot N_{int}$, де N_{int} — кратність інтерполяції.

Процедура виконується в три етапи: розтяг послідовності \bar{y} в N_{int} разів шляхом вставки $N_{int} - 1$ нулів після кожного елемента, згортка розтягнутої послідовності з вектором $\bar{h}_{ФНЧ}$ — ядром цифрового ФНЧ із скінченною імпульсною характеристикою та віконною ваговою функцією (наприклад, вікном Хеммінга) [6], підсилення послідовності в N_{int} разів.

Блок перетворення частоти (БПЧ) може бути виконаний у кількох варіантах:

БПЧ може бути взагалі відсутнім (передача в низькочастотному діапазоні, наприклад, при використанні проводової лінії зв'язку). Тоді $Y(t) = y(t)$ (альтернативний шлях сигналу в передавачі на рисунку).

Перетворення частоти за допомогою амплітудної модуляції

$$Y(t) = A \cdot (1 + m \cdot y(t)) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \phi_0),$$

де A — амплітуда несучого колювання;

m — коефіцієнт модуляції;

f_0 — центральна частота сигналу;

ϕ_0 — початкова фаза.

Балансна модуляція

$$Y(t) = A \cdot y(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \phi_0).$$

Однополосна модуляція, яка полягає в застосуванні фільтра з полосою пропускання $[f_0, f_0 + F]$ до сигналу $A \cdot y(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \phi_0)$.

Полоса частот вихідного сигналу $Y(t)$ для першого варіанту буде $[0, F]$, для другого та третього варіанту — $[f_0 - F, f_0 + F]$ і $[f_0, f_0 + F]$ для четвертого варіанту. В обчислювальній моделі застосовуються дискретні відповідники наведених формул для відліків часу, що відбуваються з періодом $t_{\delta} = 1/f_{\delta}$.

Математичну модель каналу зв'язку можна записати у вигляді

$$z(t) = Y(t) * h_c(t) + v(t) + n(t), \quad (1)$$

де $Y(t) * h_c(t)$ — згортка сигналу $Y(t)$ з імпульсною характеристикою каналу $h_c(t)$;

$v(t)$ — квазігармонічна адитивна завада;

$n(t)$ — реалізація адитивного білого гауссового шуму.

Оптимальним варіантом для проведення досліджень є використання експериментально визначеної імпульсної характеристики каналу $h_c(t)$.

Модель завади $v(t)$ формується в два етапи: генерування гауссової випадкової послідовності (модель дискретного гауссового шуму, відліки якого відбуваються з періодом t_{δ}); фільтрація отриманої послідовності цифровим фільтром із заданою амплітудно-частотною характеристикою, обмеженою в полосі частот $[f_{v1}, f_{v2}]$.

Моделлю БГШ $n(t)$ зі спектральною щільністю N_0 є послідовність реалізацій гауссової випадкової величини з нульовим математичним сподіванням та дисперсією $2\sigma_n^2$.

Першим етапом обробки вхідного до приймача сигналу $z(t)$ є полосова фільтрація. Полоса пропускання фільтра відповідає полосі сигналу $Y(t)$ залежно від методу перетворення частоти. Результат фільтрації позначимо $z_{\text{пф}}(t)$.

Наступні етапи вхідної обробки сигналу багатоваріантні.

Якщо перетворення частоти не здійснювалось, то сигнал $z_{\text{пф}}(t)$ або безпосередньо подається на вхід корелятора, або піддається аналогово-цифровому перетворенню (АЦП). У моделі ця процедура відображається шляхом децимації послідовності, що зображує в цифровому вигляді сигнал $z_{\text{пф}}(t)$.

Роботу корелятора в моделі відображає обчислення скалярного добутку двох векторів. Для формування цих векторів вибираються елементи послідовності, яка зображує в моделі вхідний до корелятора сигнал $Z(t)$. При цьому може бути задіяний зсув нумерації елементів, який моделює похибку синхронізації.

Якщо в передавачі було виконано перетворення частоти сигналу за допомогою амплітудної модуляції, то пониження частоти (ПЧ) (зворотні перетворення) сигналу відбувається шляхом застосування ФНЧ до сигналу $|z_{\text{пф}}(t)|$. Результуючий сигнал $z_{\text{пч}}(t)$ може бути або безпосередньо поданий на вхід корелятора, або попередньо підданий АЦП.

Те саме стосується сигналу $z_{\text{пч}}(t)$ при застосуванні балансної або однополосної модуляції. Однак, пониження частоти відбувається в цьому випадку когерентними методами.

Якщо центральна частота f_0 сигналу $z(t)$ кратна ширині полоси F , то на інтервалі опорного сигналу T вкладається ціла кількість хвиль відповідного гармонійного сигналу. У такому випадку $z_{\text{пф}}(t)$ можна подати на вхід корелятора без пониження частоти.

На виході корелятора маємо число $\hat{r} = r(t)$, по знаку якого детектор приймає рішення про прийом символу $\hat{\lambda} = 0$ чи $\hat{\lambda} = 1$. Порівняння переданого символу λ та прийнятого $\hat{\lambda}$ дозволяє встановити вірність прийому.

Багаторазове повторення досліду при фіксованих умовах з різними реалізаціями стохастичних послідовностей дозволяє оцінити імовірність помилки передачі інформаційного біта $P_b \approx N_n / N_d$, де N_n — зафіксована кількість помилок, N_d — загальна кількість проведених дослідів.

Отже, запропонована методика моделювання систем зв'язку з ФМШС дозволяє на достатньому рівні точності відтворити процеси функціонування основних структурних блоків системи зв'язку з ФМШС. Передбачена можливість розглядати різноманітні методи перетворення частоти сигналу в передавачі та відповідні варіанти обробки сигналу на приймальній стороні. Це дозволяє здійснити оптимізацію структури та принципів функціонування вихідного тракта передавача та вхідного тракта приймача.

Модель каналу зв'язку враховує не ідеальну імпульсну характеристику каналу, присутність корельованих завад від вузькополосних станцій, що працюють у даному діапазоні частот, та завади у вигляді адитивного білого гауссового шуму.

Література

1. Математичне моделювання систем зв'язку з кореляційно-часовою модуляцією / Первунінський С.М., Дідковський Р.М., Метелап В.В., Тобілевич Ю.Є. // Вісн. Черкас. ун-ту. Серія "Прикладна математика". — Черкаси, 2006. — Випуск 83. — С.112 — 123.
2. Дідковський, Р.М. Порівняльний аналіз завадостійкості бінарних систем зв'язку з протилежними шумовими сигналами / Р.М. Дідковський // Вісн. ДУІКТ. — К., 2011. — Т. 9, № 1. — С.40 — 50.

3. Первунінський, С.М. Обчислення імовірності помилки приймача фазоманіпульованого шумового сигналу методом характеристичних функцій / С.М. Первунінський, Р.М. Дідковський // *Наук. пр. ОНАЗ ім. О.С. Попова*. — Одеса, 2011. — № 1. — С.33 — 42.
4. Тихонов, В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. — М.: Радио и связь, 1991. — 608 с.
5. Стохастические сигналы и спектры: учеб. пособие / В.П. Бабак, А.Я. Белецкий, А.Ф. Приставка, Ф.А. Приставка. — К.: КИТ, 2004. — 290 с.
6. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. для вузов / А.Б. Сергиенко. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2007. — 751 с.

References

1. Matematychnе modeliuвання system zviazku z koreliatsiino-chasovoiu moduliatsiieiu [Mathematical Modeling of Time-Correlated Modulation Communication Systems] / Pervuninskyi S.M., Didkovskiy R.M., Metelap V.V., Tobilevych Yu.Ye. // *Visn. Cherkas. un-tu. Seriya "Prykladna matematyka"* [Herald of Cherkasy Univ.: Ser. "Applied Mathematics"], Cherkasy, 2006. — Iss. 83. — pp.112 — 123.
2. Didkovskiy, R.M. Porivnialnyi analiz zavadostiikosti binarnykh system zviazku z protylezhnyimi shumovymi syhnalami [Comparative Analysis of the Noise Immunity of Binary Communication Systems with Opposite Noise Signals] / R.M. Didkovskiy // *Visn. DUKIT*. [Herald of Kyiv Univ.] — Kuiv, 2011. — Vol. 9, # 1. — pp. 40 — 50.
3. Pervuninskyi, S.M. Obchyslennia imovirnosti pomylyky pryimacha fazomanipulovanoho shumovoho syhnalu metodom kharakterystychnykh funktsii [Calculating Error Probability of Phase-Modulated Signal Receiver by the Method of Characteristic Functions] / S.M. Pervuninskyi, R.M. Didkovskiy // *Nauk. pr. ONAZ im. O.S. Popova*. [Proc. of ONAC named after O.S. Popov]. — Odessa, 2011. — # 1. — pp. 33 — 42.
4. Tikhonov, V.I. Statisticheskiy analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem: ucheb. dlya vuzov. [Statistical Analysis and Synthesis of Radio Technical Devices and Systems: A Textbook for Institutes of Higher Education] / V.I. Tikhonov, V.N. Kharisov. — Moscow, 1991. — 256 p.
5. Babak, V.P. Stokhasticheskie signaly i spektry: Ucheb. posobie [Stochastic Signals and Spectra: A Tutorial] / V.P. Babak, A.Ya. Beletsky, A.F. Pristavka, F.A. Pristavka. — Kuiv, 2004. — 290 p.
6. Sergienko, A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov: ucheb. dlya vuzov. [Digital Signal Processing: A Textbook for Institutes of Higher Education] / A.B. Sergienko. — 2nd edition, — St-Peterburg, 2007. — 751 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Мазурков М.І.

Надійшла до редакції 13 лютого 2012 р.