

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

## ВПЛИВ ПОМИЛКИ СИНХРОНІЗАЦІЇ НА ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З ФАЗОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ ШУМОВОГО СИГНАЛУ

*С.М. Первунінський, Р.М. Дідковський.* **Вплив помилки синхронізації на завадостійкість систем зв'язку з фазовою маніпуляцією шумового сигналу.** Запропоновано методику дослідження впливу помилки тактової синхронізації на завадостійкість системи зв'язку з фазовою маніпуляцією шумового сигналу. Методами імітаційного обчислювального експерименту отримано залежності імовірності помилки прийому біта від відношення сигнал-завада та помилки синхронізації.

*Ключові слова:* тактова синхронізація, помилка синхронізації, фазова маніпуляція шумового сигналу, завадостійкість системи.

*С.М. Первунинский, Р.М. Дидковский.* **Влияние ошибки синхронизации на помехоустойчивость систем связи с фазовой манипуляцией шумового сигнала.** Предложена методика исследования влияния ошибки тактовой синхронизации на помехоустойчивость системы связи с фазовой манипуляцией шумового сигнала. Методами имитационного вычислительного эксперимента получены зависимости вероятности ошибки приема бита от отношения сигнал-помеха и ошибки синхронизации.

*Ключевые слова:* тактовая синхронизация, ошибка синхронизации, фазовая манипуляция шумового сигнала, помехоустойчивость системы.

*S.M. Pervuninsky, R.M. Didkowsky.* **Effect of synchronization error on the performance of differential.** A method for studying clock synchronization error effect on performance of differential noise-phase-shift-keying communication systems is proposed. With the methods of computer simulation experiment the dependencies of bit-error probability upon signal-to-noise ratio and synchronization error are obtained.

*Keywords:* clock/bit synchronization, synchronization error, phase-shift keying of noise signal, noise immunity of the system.

Відома система зв'язку з фазовою маніпуляцією шумового сигналу (ФМШС) [1]. Дана система вирізняється кількома особливостями: порівняно високий рівень завадостійкості, простий алгоритм формування та прийому сигналу, незалежний від рівня завад нульовий поріг детектора тощо. Слід відмітити, що в більшості досліджень визначення потенційної завадостійкості систем з шумовими сигналами проводилося в передбаченні про ідеальну синхронізацію приймача і передавача системи [2, 3], що неможливо на практиці.

Для розробки методів синхронізації систем даного типу важливо визначити вимоги до точності синхронізації. Дослідимо стійкість системи зв'язку з ФМШС до втрати синхронізації.

Розглянемо один із можливих варіантів побудови системи зв'язку з ФМШС, що передбачає цифрові методи формування та обробки сигналів.

На передавальній стороні протягом кожного бітового інтервалу тривалості  $t_b$ , що поділений на два підінтервала тривалості  $t_0$  ( $t_b = 2t_0$ ), формується кортеж векторів  $\bar{y} = (\bar{x}, \alpha\bar{x})$ , де кожна координата вектора  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{n_0})$  є реалізацією деякої випадкової величини з нульовим математичним сподіванням, коефіцієнт  $\alpha = 1$ , якщо поточний інформаційний біт дорівнює "1", і  $\alpha = -1$ , якщо — "0",  $n_0$  — розмірність опорного вектора. Вектор  $\bar{x}$  є дискретним представленням опорного, а  $\alpha\bar{x}$  — інформаційного сигналу. Дискретний сигнал  $\bar{y}$  надходить по-

слідовно на цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), фільтр та підсилювач і подається в канал зв'язку. Вихідний сигнал передавача позначимо  $y(t)$ .

На вхід приймача надходить сигнал  $z(t) = y(t) + n(t)$ , де  $n(t)$  — білий гаусівський шум. Після проходження аналогово-цифрового перетворювача отримуємо векторне представлення вхідного сигналу

$$\bar{z} = \bar{y} + \bar{n} = (\bar{x}, \alpha\bar{x}) + (\bar{n}_1, \bar{n}_2) = (\bar{x} + \bar{n}_1, \alpha\bar{x} + \bar{n}_2),$$

де  $\bar{n}_1$  — фрагмент сигналу завад, що відповідає опорному сигналу, а  $\bar{n}_2$  — інформаційному. Прийом сигналу здійснюється автокореляційним методом. За умов ідеальної синхронізації корелятор обчислює скалярний добуток векторів, що відповідають опорному та інформаційному сигналу

$$r = \langle \bar{x} + \bar{n}_1, \alpha\bar{x} + \bar{n}_2 \rangle = \alpha \langle \bar{x}, \bar{x} \rangle + \alpha \langle \bar{x}, \bar{n}_1 \rangle + \langle \bar{x}, \bar{n}_2 \rangle + \langle \bar{n}_1, \bar{n}_2 \rangle \quad (1)$$

Знак величини  $r$  визначає значення прийнятого інформаційного біта. Якщо  $r > 0$ , то приймається рішення про прийом одиниці, а якщо  $r < 0$ , то про прийом нуля.

Різницю між часом, визначеним приймачем як момент початку поточного  $i$ -го бітового інтервалу та істинним його положенням у часі, будемо називати помилкою синхронізації  $\Delta t_s$ . Із опису системи зрозуміло, що при великих помилках  $\Delta t_s > t_0$  можливість правильного прийому даних втрачається повністю.

Дослідимо, як впливають на завадостійкість малі помилки синхронізації  $\Delta t_s < t_0/2$ . Позначимо  $\Delta t_n$  — період роботи ЦАП передавача. Далі будемо визначати помилку синхронізації  $\Delta t_s / \Delta t_n$  у відносних одиницях. Будемо також вважати, що стабільність внутрішніх тактових генераторів передавача і приймача достатня для підтримання сталої помилки синхронізації в межах принаймні одного бітового інтервалу  $t_b$ .

Втрата точності синхронізації передавача і приймача системи з ФМШС впливає на правильність прийому (рис. 1). Побудови на рисунку виконані за відсутності каналних завад при  $n_0 = 16$  і  $\Delta t_s / \Delta t_n = 9/4$ . Координати вектора опорного сигналу  $\bar{x}$  розподілені за нормальним законом з нульовим математичним сподіванням.

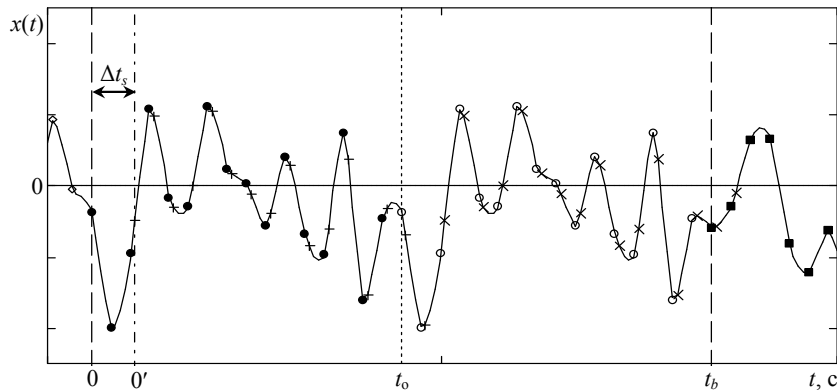


Рис. 1. Вибірка значень вхідного сигналу за наявності помилки синхронізації: аналоговий сигнал на вході приймача (—); істинні відліки: інформаційного сигналу з попереднього бітового інтервалу ( $\diamond\diamond\diamond$ ), з поточного бітового інтервалу ( $\circ\circ\circ$ ); опорного сигналу: з поточного бітового інтервалу ( $\bullet\bullet\bullet$ ), з наступного бітового інтервалу  $\blacksquare\blacksquare\blacksquare$ ; вибірка значень: опорного сигналу ( $+++$ ), інформаційного сигналу ( $\times\times\times$ )

На рисунку по осі часу точками 0 і 0' показано відповідно істинне положення початку бітового інтервалу та хибне, визначене в приймачі. Різниця між цими моментами часу і є помил-

кою синхронізації  $\Delta t_s$ . Подамо відносну помилку синхронізації у вигляді суми цілої і дробової частини  $\Delta t_s / \Delta t_n = \Delta n_s + \Delta p_s$ .

Якщо ціла частина  $\Delta n_s$  відмінна від нуля, то при обчисленні статистики за формулою (1) відбувається “заміщення” відповідної кількості координат вектора  $\bar{x}$  значеннями, що не мають відповідників в інформаційному сигналі  $\alpha \bar{x}$ . Значення дробової частини  $\Delta p_s$  визначається “зсувом” моменту вимірювання амплітуди сигналу в аналогово-цифровому перетворювачу (АЦП) приймача відносно моменту подачі імпульсу в ЦАП передавача. На рисунку 1 помилка “заміщення”  $\Delta n_s = 2$ , а помилка “зсуву”  $\Delta p_s = 0,25$ .

Нехай  $i$  — номер поточного інформаційного біта,  $\alpha_i$  — відповідний інформаційний параметр,  $\bar{x}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n_0})$  — вектор опорного сигналу. Тоді вибіркоче значення опорного сигналу з урахуванням помилки синхронізації

$$\begin{aligned} & (x_{i,1+\Delta n_s} + x'_1, x_{i,2+\Delta n_s} + x'_2, \dots, x_{i,n_0} + x'_{n_0-\Delta n_s}, \alpha_i x_{i,1} + x'_{n_0-\Delta n_s+1}, \dots, \alpha_i x_{i,\Delta n_s} + x'_{n_0}) = \\ & = (x_{i,1+\Delta n_s}, x_{i,2+\Delta n_s}, \dots, x_{i,n_0}, 0, \dots, 0) + (x'_1, x'_2, \dots, x'_{n_0-\Delta n_s}, x'_{n_0-\Delta n_s+1}, \dots, x'_{n_0}) + \\ & + (0, 0, \dots, 0, \alpha x_{i,1}, \dots, \alpha x_{i,\Delta n_s}). \end{aligned}$$

Перший доданок цього виразу подає правильну частину вибіркових даних, другий доданок визначає помилку “зсуву”, а третій помилку “заміщення”. Всі координати  $x'_j$  функціонально залежать від помилки “зсуву”  $\Delta p_s$ .

Аналогічно вибіркоче значення інформаційного сигналу

$$\begin{aligned} & (\alpha_i x_{i,1+\Delta n_s} + x''_1, \alpha_i x_{i,2+\Delta n_s} + x''_2, \dots, \alpha_i x_{i,n_0} + x''_{n_0-\Delta n_s}, \alpha_{i+1} x_{i+1,1} + x''_{n_0-\Delta n_s+1}, \dots, \alpha_{i+1} x_{i+1,\Delta n_s} + x''_{n_0}) = \\ & = (\alpha_i x_{i,1+\Delta n_s}, \alpha_i x_{i,2+\Delta n_s}, \dots, \alpha_i x_{i,n_0}, 0, \dots, 0) + (x''_1, x''_2, \dots, x''_{n_0-\Delta n_s}, x''_{n_0-\Delta n_s+1}, \dots, x''_{n_0}) + \\ & + (0, 0, \dots, 0, x_{i+1,1}, \dots, x_{i+1,\Delta n_s}). \end{aligned}$$

Звідси, за умов наявності помилки синхронізації, перший доданок формули (1) перетвориться на суму добутків векторів, лише один з яких

$$\langle (x_{i,1+\Delta n_s}, x_{i,2+\Delta n_s}, \dots, x_{i,n_0}, 0, \dots, 0), (\alpha_i x_{i,1+\Delta n_s}, \alpha_i x_{i,2+\Delta n_s}, \dots, \alpha_i x_{i,n_0}, 0, \dots, 0) \rangle$$

несе корисну інформацію, а всі інші створюють внутрішньо-системну заваду, зумовлену помилкою синхронізації.

Дослідимо вплив цих завад на імовірність помилки прийому біта інформації  $P_b$  при відсутності завад каналу зв'язку. Крива залежності  $P_b$  від відносної помилки синхронізації  $\Delta t_s / \Delta t_n$  при  $n_0 = 16$  отримана шляхом проведення серії імітаційних обчислювальних експериментів (рис. 2, а). Розрахунок вибіркових значень вхідного до приймача сигналу в проміжних точках між відліками ЦАП передавача здійснювався за допомогою фільтра-інтерполятора, імпульсна характеристика  $h_i$  якого отримана експериментально [4] (рис. 2, б). Вимірювання проводились при відношенні частоти дискретизації приймача до частоти дискретизації передавача такому, що дорівнює чотирьом. Це дозволило розглянути дробові значення відносної помилки синхронізації з кроком 1/4.

Головний тренд залежності імовірності помилки  $P_b$  від  $\Delta t_s / \Delta t_n$  визначається помилкою “заміщення”, а періодичні коливання навколо тренда обумовлені помилкою “зсуву”.

Вплив помилки “зсуву” сильно залежить від імпульсної характеристики каналу. Причому до каналу зв'язку в цьому випадку зручно приєднати також ЦАП і вихідний тракт передавача, з одного боку, а також вхідний тракт приймача та його АЦП, з іншого боку, оскільки для прямого спостереження доступні лише сигнали в цифровій формі. У досліджуваному прикладі най-

більш несприятливою виявилася ситуація, коли дробова частина відносної помилки синхронізації лежить в межах  $1/2 \leq \Delta p_s \leq 3/4$ .

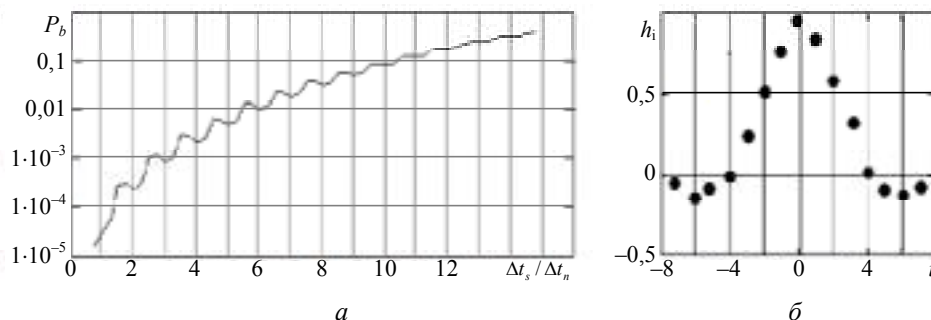


Рис. 2. Залежність імовірності помилки прийому інформаційного біта від відносної помилки синхронізації та відсутності завад каналу (а); імпульсна характеристика фільтра-інтерполятора (б)

Дослідимо тепер завадостійкість системи при наявності помилки синхронізації. При збереженні наведених умов оцінимо залежність імовірності помилки  $P_b$  від відношення сигнал-завада  $q^2 = E_b / N_0$  за наявності фіксованого рівня помилки синхронізації. Криві залежностей  $P_b$  від  $q^2$  отримані методом імітаційного обчислювального експерименту при  $n_0 = 16$  (рис. 3).

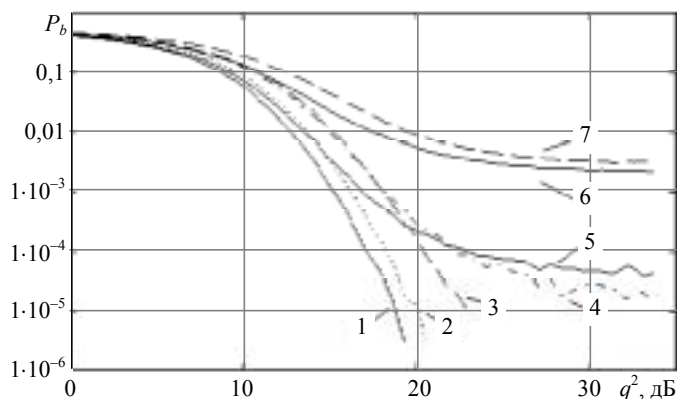


Рис. 3. Залежність імовірності помилки прийому інформаційного біта від відношення сигнал-завада при значеннях помилки синхронізації: 0 (1), 0,25 (2), 0,5 (3), 0,75 (4), 1,0 (5), 4,0 (6), 3,5 (7)

Із рисунку видно, що при наявності помилки синхронізації імовірність  $P_b$  з ростом відношення сигнал-завада  $q^2$  прямує не до нуля, а до певного порогового рівня, більшого за нуль. Значення цього порогового рівня для заданої величини  $\Delta t_s / \Delta t_n$  можна встановити по рис. 2, а.

Із проведеного аналізу випливає, що здійснення точної синхронізації є одним із найважливіших елементів у комплексі заходів щодо забезпечення необхідного рівня завадостійкості системи. Слід відмітити, що імовірність помилки передачі біта з ростом помилки синхронізації наростає не стрибкоподібно, однак втрата більше половини опорного сигналу робить вже неможливим досягнення значень імовірностей помилки синхронізації менших ніж 0,01.

## Література

1. Математичне моделювання систем зв'язку з кореляційно-часовою модуляцією / С.М. Первунінський, Р.М. Дідковський, В.В. Метеллап, Ю.Є. Тобілевич // Вісн. Черкас. ун-ту: Сер. "Прикладна математика" — Черкаси, 2006. — Вип. 83. — С. 112 — 123.

2. Семенов, А.М. Широкополосная радиосвязь / А.М. Семенов, А.А. Сикарев. — М.: Воениздат, 1970. — 278 с.
3. Первунінський, С.М. Дослідження завадостійкості бінарного автокореляційного приймача шумових сигналів з фазовою маніпуляцією / С.М. Первунінський, Р.М. Дідковський, В.В. Метеллап // Наук. зап. УНДІЗ. — Київ, 2008. — № 1(3). — С. 56 — 63.
4. Дідковський, Р.М. Побудова експериментальної провідної системи зв'язку з шумовими сигналами / Р.М. Дідковський // Пр. Міжнар. наук.-практ. конф. "Обробка сигналів і негауссівських процесів". — Черкаси: ЧДТУ, 2009. — С. 186 — 187.

#### References

1. Matematychnе modeliuвання system zviazku z koreliatsiino-chasovoiu moduliatsiieiu [Mathematical modeling of time-correlated modulation communication systems] / S.M. Pervuninskyi, R.M. Didkovskiy, V.V. Metelap, Yu.Ye. Tobilevych // Visn. Cherkas. un-tu: Ser. "Prykladna matematyka" [Herald of Cherkasy Univ.: Ser. "Applied Mathematics"] — Cherkasy, 2006. — Iss. 83. — PP. 112 — 123.
2. Semenov, A.M. Shirokopolosnaya radiosvyaz' [Broadband radio communication] / A.M. Semenov, A.A. Sikarev. — Moscow, 1970. — 278 p.
3. Pervuninskyi, S.M. Doslidzhennia zavadostiikosti binarnoho avtokoreliatsiinoho pryimacha shumovykh syhnaliv z fazovoiu manipuliatsiieiu [Research of noise immunity of a binary autocorrelation receiver of phase keying noise] / S.M. Pervuninskyi, R.M. Didkovskiy, V.V. Metelap // Nauk. zap. UNDIZ [Sci.papers of UNDIZ]. — Kyiv, 2008. — # 1(3). — PP. 56 — 63.
4. Didkovskiy, R.M. Pobudova eksperymentalnoi providnoi systemy zviazku z shumovymy syhnalamy [Construction of an experimental wire communication system with noise] / R.M. Didkovskiy // Pr. Mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Obrobka syhnaliv i nehaussivskykh protsesiv" [Intern. sci.-pract. conf. "Non-Gaussian processes and signal processing"] — Cherkasy, 2009. — PP. 186 — 187.

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

Надійшла до редакції 4 квітня 2011 р.