

УДК 621.396

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.196277

РАЗРАБОТКА СЛЕПОЙ КАДРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ БЛОКОВЫМ КОДИРОВАНИЕМ

Токарь М. С.

РОЗРОБКА СЛПОЇ КАДРОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ДЛЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ З ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ ПРОСТОРООВО-ЧАСОВИМ БЛОКОВИМ КОДУВАННЯМ

Токар М. С.

DEVELOPMENT OF BLIND FRAME SYNCHRONIZATION FOR TRANSFER SYSTEM WITH DIFFERENTIAL SPACE-TIME BLOCK CODING

Токар М.

Об'єктом дослідження даної роботи є методи і алгоритми кадрової синхронізації, використувані в системах багатоантенного радіозв'язку (Multiple Input Multiple Output – МІМО). Реалізація систем радіозв'язку і, зокрема МІМО, має на увазі забезпечення в демодуляторі синхронізації по фазі опорної несучої і за часом процесів обробки сигналів. Синхронізація за часом розділяється на символну і кадрову синхронізації. Що стосується синхронізації опорної несучої і символної синхронізації, то ці види синхронізації забезпечуються традиційними методами і в даній роботі не розглядаються. Кадрова синхронізація в переважній більшості випадків забезпечується застосуванням пілот-сигналів (синхрослів). За своєю суттю вони є маркерами і періодично вбудовуються в потік даних для позначення початку чергового нового блоку даних. Ресурси системи передачі, що витрачаються на передачу пілот-сигналів, не задіюються для передачі інформації користувача, через що погіршується ефективність використання частотно-тимчасового ресурсу системи. У більш меншому обсязі існують так звані «сліпі» методи обробки сигналів, що ґрунтуються на властивостях надмірності переданого сигналу. Ці методи не мають недоліків від застосування пілот-сигналів і поділяються на методи оцінки стану каналу зв'язку, ідентифікації сигналів і синхронізації. Виходячи з цього, такі методи представляють практичний інтерес.

У даній роботі пропонується спосіб кадрової синхронізації для демодуляції сигналів диференціального просторово-часового блокового кодування при застосуванні технології МІМО. Алгоритм синхронізації не вимагає використання преамбул і синхрослів, що забезпечує ефективне використання частотно-тимчасового ресурсу. Аналіз структури алгоритму і результати моделювання показують його працездатність при низьких відносинах сигнал/шум в

системі передачі. Алгоритм не вимагає знань про стан каналу зв'язку, має малу обчислювальну складність, в порівнянні з існуючими аналогами, і допускає реалізацію при різному числі передавальних і приймальних антен.

Ключові слова: система МІМО, кадрова синхронізація, пілот-сигнал, частотно-часовий ресурс, сліпий метод обробки сигналів, просторово-часова надмірність сигналу.

Объектом исследования данной работы являются методы и алгоритмы кадровой синхронизации, используемые в системах многоантенной радиосвязи (Multiple Input Multiple Output – МІМО). Реализация систем радиосвязи и, в частности МІМО, подразумевает обеспечение в демодуляторе синхронизации по фазе опорной несущей и по времени процессов обработки сигналов. Синхронизация по времени разделяется на символьную и кадровую синхронизации. Что касается синхронизации опорной несущей и символьной синхронизации, то эти виды синхронизации обеспечиваются традиционными методами и в данной работе не рассматриваются. Кадровая синхронизация в подавляющем большинстве случаев обеспечивается применением пилот-сигналов (синхрослов). По своей сути они являются маркерами и периодически встраиваются в поток данных для обозначения начала очередного нового блока данных. Ресурсы системы передачи, затрачиваемые на передачу пилот-сигналов, не задействуются для передачи информации пользователя, ввиду чего ухудшается эффективность использования частотно-временного ресурса системы. В более меньшем объеме существуют так называемые «слепые» методы обработки сигналов, основывающиеся на свойствах избыточности передаваемого сигнала. Эти методы не имеют недостатков от применения пилот-сигналов и подразделяются на методы оценки состояния канала связи, идентификации сигналов и синхронизации. Исходя из этого, такие методы представляют практический интерес.

В данной работе предлагается способ кадровой синхронизации для демодуляции сигналов дифференциального пространственно-временного блочного кодирования при применении технологии МІМО. Алгоритм синхронизации не требует использования преамбул и синхрослов, что обеспечивает эффективное использование частотно-временного ресурса. Анализ структуры алгоритма и результаты моделирования показывают его работоспособность при низких отношениях сигнал/шум в системе передачи. Алгоритм не требует знаний о состоянии канала связи, имеет малую вычислительную сложность, по сравнению с существующими аналогами, и допускает реализацию при различном числе передающих и приемных антенн.

Ключевые слова: система МІМО, кадровая синхронизация, пилот-сигнал, частотно-временный ресурс, слепой метод обработки сигналов, пространственно-временная избыточность сигнала.

1. Введение

Настоящая работа является продолжением исследований, посвященных разработке метода передачи с дифференциальным пространственно-временным блочным кодированием (ДПВБК), реализуемого при применении технологии Multiple Input Multiple Output (МІМО) [1].

Для реализации метода передачи с ДПВБК в демодуляторе необходимо обеспечить синхронизацию по фазе опорной несущей, а также синхронизацию по времени процессов обработки сигналов [2, 3]. Задача синхронизации по времени разделяется на две: символьная (тактовая) синхронизация и кадровая (блоковая) синхронизация. Данные два вида временной синхронизации совершенно разные по назначению и реализации. Задача синхронизации символов состоит в синхронизации тактов демодулятора с входным потоком демодулируемых канальных символов, чтобы каждый входной символ был обработан в надлежащем интервале времени. Задача синхронизации кадров (блоков) состоит в разбиении последовательности символов, поступающих на декодер, на блоки, соответствующие блокам на выходе кодера. Если разбивка проведена не верно, операции декодирования будут некорректными и восстановление передаваемых символов становится невозможным.

Что касается синхронизации опорной несущей и символьной синхронизации, то эти виды синхронизации в демодуляторах сигналов цифровой модуляции решаются традиционными методами [4, 5] и в данной работе не рассматриваются.

Из литературных источников следует, что в подавляющем большинстве случаев кадровая синхронизация обеспечивается применением пилот-сигналов (синхрослов) (Reference Signal) [6, 7] – сигналов, априорно известных в демодуляторе, имеющих определенные характеристики и свойства. По своей сути они являются маркерами и периодически встраиваются в поток данных для обозначения начала очередного нового блока данных. Очевидно, что ресурсы системы передачи, затрачиваемые на передачу пилот-сигналов, не используются непосредственно для передачи информации пользователя, ввиду чего ухудшается эффективность использования частотно-временного ресурса системы передачи. Также в литературе представлены, но в более меньшем объеме, так называемые «слепые» методы обработки сигналов, которые не требуют передачи специальных пилот-сигналов, а основываются на свойствах передаваемого информационного сигнала, в частности, используя его избыточность [6, 8]. Эти методы не имеют недостатков, создаваемых применением пилот-сигналов, и подразделяются на методы оценки состояния канала связи, идентификации сигналов и синхронизации. Исходя из этого, такие методы представляют практический интерес.

Имеются работы [9, 10], описывающие методы «слепой» кадровой синхронизации для ортогонального пространственно-временного блочного кодирования (STBC). Следует отметить, что эти методы:

- используют пространственно-временную избыточность передаваемого сигнала (кадров);
- применимы для ортогональных систем STBC с одной и двумя приемными антеннами;
- не требуют знания о состоянии канала связи и отношения сигнал-шум в канале;
- обеспечивают низкую способность обнаружения границ кадровых интервалов в канале связи с релеевскими замираниями при высоких отношениях сигнал/шум, как заявляют сами авторы.

Необходимо также отметить, что в литературе описаны только эти два метода «слепой» кадровой синхронизации для ортогональных систем STBC, а методы синхронизации для дифференциальных ортогональных систем STBC – не описаны.

Исходя из изложенного, для обеспечения кадровой синхронизации при демодуляции сигналов ДПВБК, было принято решение на базе данного метода кодирования разработать эффективный алгоритм кадровой синхронизации без использования пилот-сигналов, что является целью данной работы. Таким образом, объектом исследования данной работы являются методы и алгоритмы кадровой синхронизации, используемые в системах многоантенной радиосвязи (MIMO).

2. Методика проведения исследования

Ниже представлен алгоритм синхронизации демодулятора сигналов ДПВБК [1] в схеме MIMO 2×2 и 2×4 . Поскольку при ДПВБК каждый канальный символ передается дважды – примером может служить сигнальная матрица:

$$\mathbf{X}_v = \begin{bmatrix} x_i & -x_{i+1}^* \\ x_{i+1} & x_i^* \end{bmatrix},$$

где x_i^* – комплексное сопряжение символа x_i , то следует вывод, что демодулируемый сигнал имеет пространственно-временную избыточность, и возможно найти способ синхронизации по рабочему сигналу.

В табл. 1 приведены четыре последовательных кадра, передаваемых по каналу связи. Здесь x_i – канальные символы сигнала L-PSK.

Таблица 1

Таблица передачи символов дифференциальным пространственно-временным блоковым кодированием

Момент времени	t	$t+1$	$t+2$	$t+3$	$t+4$	$t+5$	$t+6$	$t+7$
Антенна № 1	x_1	$-x_2^*$	x_3	$-x_4^*$	x_5	$-x_6^*$	x_7	$-x_8^*$
Антенна № 2	x_2	x_1^*	x_4	x_3^*	x_6	x_5^*	x_8	x_7^*
№ кадра	кадр 1		кадр 2		кадр 3		кадр 4	

Если необходимо демодулировать информацию, переданную кадром 3 – $\mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} x_5 & -x_6^* \\ x_6 & x_5^* \end{bmatrix}$, то соответственно требуется кадр 2 – $\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} x_3 & -x_4^* \\ x_4 & x_3^* \end{bmatrix}$, который будет являться опорным. Так происходит при верной кадровой синхронизации. Проанализировав табл. 1 можно допустить два ближайших случая, при которых кадровая синхронизация установлена не верно. В первом случае имеем следующие значения опорной и сигнальной матриц:

$$\mathbf{X}_{2err_1} = \begin{bmatrix} -x_2^* & x_3 \\ x_1^* & x_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}_{3err_1} = \begin{bmatrix} -x_4^* & x_5 \\ x_3^* & x_6 \end{bmatrix}.$$

Во втором случае соответственно:

$$\mathbf{X}_{2err_r} = \begin{bmatrix} -x_4^* & x_5 \\ x_3^* & x_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}_{3err_r} = \begin{bmatrix} -x_6^* & x_7 \\ x_5^* & x_8 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, получаем три возможных состояния, в одном из которых кадровая синхронизация установлена верно, а в двух других – не верно. Гипотезы по этим состояниям можно соответственно условно назвать: «рано», «правильно» и «поздно».

Рассмотрим демодуляцию символов в случае гипотезы – «правильно». Отсчеты сигналов, принятых приемными антеннами (кадр 2 и кадр 3), в соответствующие моменты времени могут быть записаны как:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(t+2)} & y_2^{(t+2)} \\ y_1^{(t+3)} & y_2^{(t+3)} \end{bmatrix} = \mathbf{X}_2^T \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1^{(t+2)} & w_2^{(t+2)} \\ w_1^{(t+3)} & w_2^{(t+3)} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{Y}_2 = \mathbf{X}_2^T \mathbf{H} + \mathbf{W}_2, \quad \rightarrow \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_1^{(t+4)} & y_2^{(t+4)} \\ y_1^{(t+5)} & y_2^{(t+5)} \end{bmatrix} = \mathbf{X}_3^T \mathbf{H} + \begin{bmatrix} w_1^{(t+4)} & w_2^{(t+4)} \\ w_1^{(t+5)} & w_2^{(t+5)} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{Y}_3 = \mathbf{X}_3^T \mathbf{H} + \mathbf{W}_3, \quad \rightarrow \quad (2)$$

где, например, $y_1^{(t+2)}$ – отсчет, принятый в момент времени $t+2$ (верхний индекс) первой антенной (нижний индекс);

$h_{m,n}$ – комплексные коэффициенты передачи канала связи от m -ой передающей антенны к n -ой приемной антенне, являющиеся некоррелированными комплексными гауссовскими случайными величинами при $h_{m,n} \sim CN(0,1)$;

$w_n^{(t)}$ – комплексные коэффициенты аддитивного белого гауссовского шума с $w_n^{(t)} \sim CN(0, \sigma^2)$ и дисперсией σ^2 .

Считаем, что условие $T_0 \gg T_s$ удовлетворяется, где T_0 – время когерентности, а T_s – длительность канального символа – следовательно матрица канальных коэффициентов \mathbf{H} в течении T_0 относительно постоянна [1]. В этом случае восстановленные значения дифференциальных коэффициентов, переданных кадром 3, определяются как:

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_1 \\ \hat{R}_2 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} (y_1^{(t+2)})^* & y_1^{(t+3)} \\ (y_1^{(t+3)})^* & -y_1^{(t+2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1^{(t+4)} \\ (y_1^{(t+5)})^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (y_2^{(t+2)})^* & y_2^{(t+3)} \\ (y_2^{(t+3)})^* & -y_2^{(t+2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_2^{(t+4)} \\ (y_2^{(t+5)})^* \end{bmatrix}}{|y_1^{(t+2)}|^2 + |y_1^{(t+3)}|^2 + |y_2^{(t+2)}|^2 + |y_2^{(t+3)}|^2}. \quad \rightarrow \quad (3)$$

Если рассмотреть схему MIMO 2×4, то формулы (1)–(3) соответственно примут следующий вид:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(t+2)} & y_2^{(t+2)} & y_3^{(t+2)} & y_4^{(t+2)} \\ y_1^{(t+3)} & y_2^{(t+3)} & y_3^{(t+3)} & y_4^{(t+3)} \end{bmatrix} = \mathbf{X}_2^T \mathbf{H} + \begin{bmatrix} w_1^{(t+2)} & w_2^{(t+2)} & w_3^{(t+2)} & w_4^{(t+2)} \\ w_1^{(t+3)} & w_2^{(t+3)} & w_3^{(t+3)} & w_4^{(t+3)} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{Y}_2 = \mathbf{X}_2^T \mathbf{H} + \mathbf{W}_2, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} y_1^{(t+4)} & y_2^{(t+4)} & y_3^{(t+4)} & y_4^{(t+4)} \\ y_1^{(t+5)} & y_2^{(t+5)} & y_3^{(t+5)} & y_4^{(t+5)} \end{bmatrix} = \mathbf{X}_3^T \mathbf{H} + \begin{bmatrix} w_1^{(t+4)} & w_2^{(t+4)} & w_3^{(t+4)} & w_4^{(t+4)} \\ w_1^{(t+5)} & w_2^{(t+5)} & w_3^{(t+5)} & w_4^{(t+5)} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{Y}_3 = \mathbf{X}_3^T \mathbf{H} + \mathbf{W}_3, \quad (5)$$

где $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \end{bmatrix}$, и

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_1 \\ \hat{R}_2 \end{bmatrix} = \frac{\sum_{n=1}^4 \left(\begin{bmatrix} (y_n^{(t+2)})^* & y_n^{(t+3)} \\ (y_n^{(t+3)})^* & -y_n^{(t+2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_n^{(t+4)} \\ (y_n^{(t+5)})^* \end{bmatrix} \right)}{\sum_{n=1}^4 (|y_n^{(t+2)}|^2 + |y_n^{(t+3)}|^2)}. \quad (6)$$

После восстановления дифференциальных коэффициентов, путем оценки максимального правдоподобия, определяется величина минимального расстояния между возможными значениями векторов $(R_1, R_2)_j$ (из множества \mathbf{R}_{all} [1]) и восстановленным вектором (\hat{R}_1, \hat{R}_2) :

$$b_{true}^{(3)} = \arg \min_{j \in \mathbf{R}_{all}} \left(|(R_1)_j - \hat{R}_1|^2 + |(R_2)_j - \hat{R}_2|^2 \right), \quad (7)$$

где верхний индекс величины $b_{true}^{(3)}$ обозначает номер кадра, в отношении которого принимается решение о синхронизации. Таким же образом можно рассчитать значения минимальных расстояний $b_{false1}^{(3)}$ и $b_{false2}^{(3)}$ по двум остальным гипотезам.

Анализ матриц \mathbf{X}_{2err} и \mathbf{X}_{3err} показывает, что в каждую из них символы x_i входят по одному разу (например, в \mathbf{X}_{2err} : $-x_2^*$, x_1^* , x_3 , x_4), а также данные матрицы не являются комплексными ортогональными формами (условие (2) в [1]). Учитывая это, а также статистическую независимость и равновероятность передаваемых символов x_i следует сделать вывод, что при демодулировании (в оценках дифференциальных коэффициентов \hat{R}_1 и \hat{R}_2) нет когерентного накопления передаваемых символов и их можно рассматривать как отсчеты реализации некоторого случайного процесса.

Следовательно, система кадровой синхронизации демодулятора ДПВБК будет анализировать обозначенные три гипотезы – «рано», «правильно» и «поздно». Сигналом выбора той или иной гипотезы будет минимальное значение суммы накопленных значений минимальных расстояний по каждой гипотезе:

$$B_{\text{false1}} = \sum_{k=1}^K b_{\text{false1}}^{(k)}, \quad B_{\text{true}} = \sum_{k=1}^K b_{\text{true}}^{(k)} \quad \text{и} \quad B_{\text{false2}} = \sum_{k=1}^K b_{\text{false2}}^{(k)},$$

где K – количество кадров (блоков) наблюдения для принятия решения о наличии/отсутствии кадровой синхронизации. Как видно из алгоритма, эти величины фильтруются (производится накопление). На каждом такте, с целью правильной установки границ кадров, производится сравнение между собой B_{false1} , B_{true} , B_{false2} и выбор той или иной гипотезы по минимальной из этих величин.

3. Результаты исследований и обсуждение

Моделирование выполнялось в пакете программ MATLAB при использовании релейского канала замираний в канале связи и соблюдении условия относительно постоянных значений канальных коэффициентов $h_{m,n}$ в течении времени когерентности T_0 . Модель состояла из двух ($M=2$) передающих и нескольких ($N=1; 2; 4$) приемных антенн, при использовании модуляции QPSK и $K=10; 20; 30; 40; 50$. Входной поток состоял из независимых равновероятных информационных $5 \cdot 10^7$ бит, который кодировался методом ДПВБК [1] в зависимости от числа позиций сигнала L-PSK и количества передающих антенн M , образуя сигнальные матрицы \mathbf{X}_v , которые передавались в радиоканал, как указано в табл. 1. На приемной стороне происходил расчет величин:

$$\mathbb{B}_{\text{false1}} = \sum_{d=1}^D B_{\text{false1}}^{(d)}, \quad \mathbb{B}_{\text{true}} = \sum_{d=1}^D B_{\text{true}}^{(d)} \quad \text{и} \quad \mathbb{B}_{\text{false2}} = \sum_{d=1}^D B_{\text{false2}}^{(d)},$$

где D – количество переданных кадровых блоков, каждый из которых состоит из K кадров. При этом по каждому из трех величин B_{false1} , B_{true} , B_{false2} принималось решение о наличии/отсутствии кадровой синхронизации конкретного кадрового блока d . Например, при количестве информационных бит $5 \cdot 10^7$, $M=2$, модуляции QPSK и $K=20$, значение $D=2,5 \cdot 10^6$. Результаты моделирования представлены на рис. 1, 2 в виде зависимостей вероятности выхода из синхронизма (потери синхронизма) $P_{er_sinch} = \frac{D_{error}}{D}$, где D_{error} – количество принятых кадровых блоков с отсутствием кадровой синхронизации, от отношения сигнал/шум в системе (SNR).

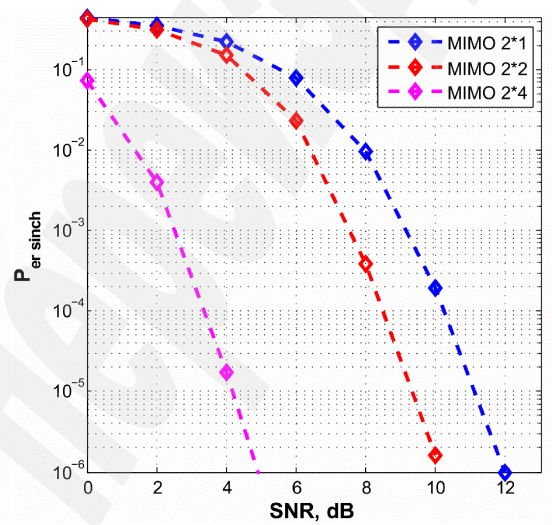
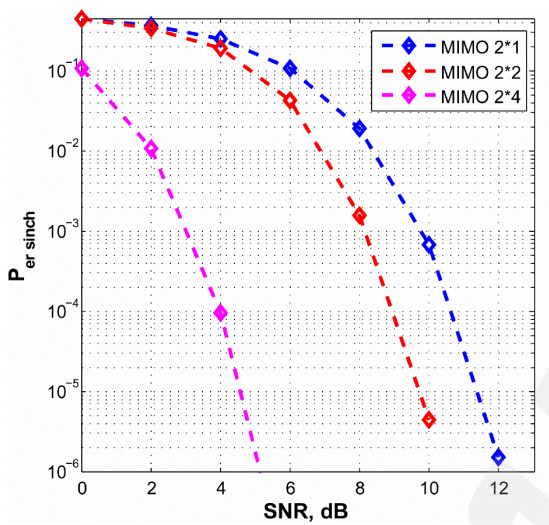
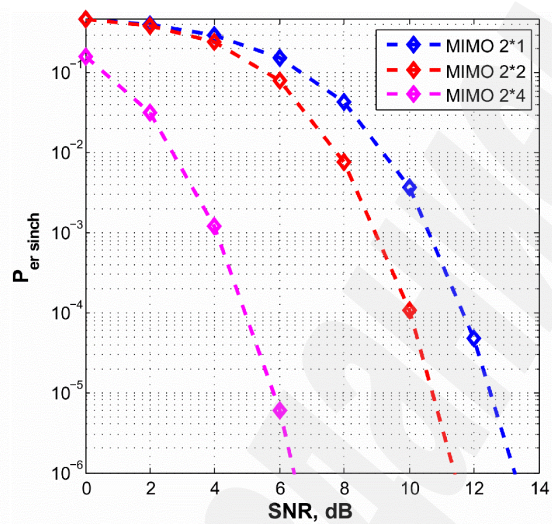
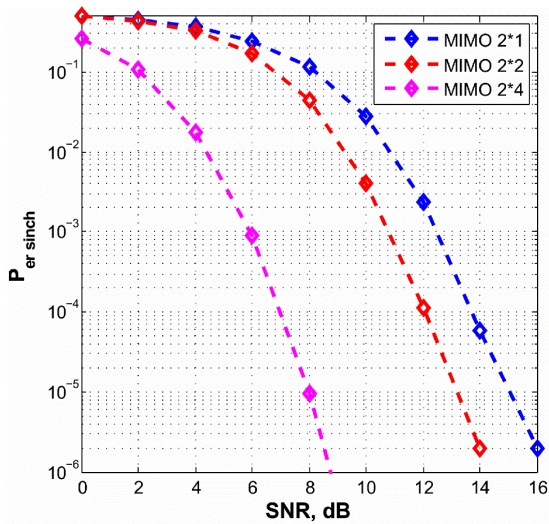


Рис. 1. Зависимости P_{er_sinch} от SNR для различного количества N при QPSK:
a – при $K=10$; *б* – при $K=20$; *в* – при $K=30$; *г* – при $K=40$

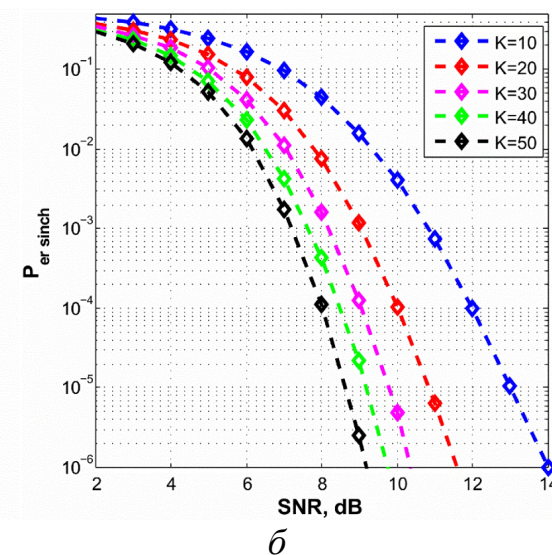
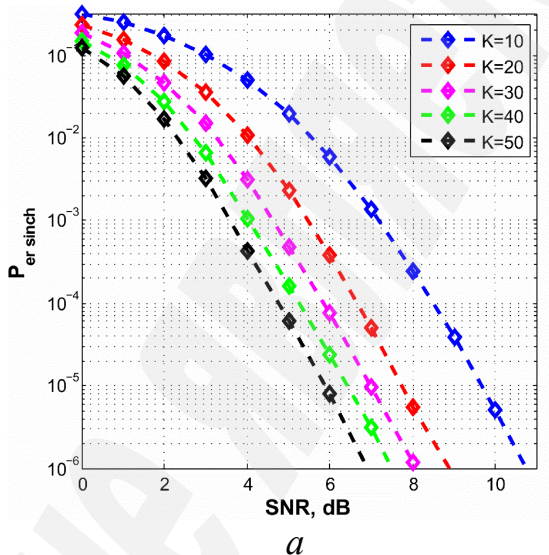


Рис. 2. Зависимости P_{er_sinch} от SNR при $K=10; 20; 30; 40; 50$, MIMO 2×2 :
a – при BPSK; *б* – при QPSK

Исходя из анализа алгоритма и результатов моделирования, необходимо отметить следующее:

1) разработанному алгоритму синхронизации для анализа и принятия решения требуется значительно меньшее число кадров (10–40), нежели, чем требуется методам, представленным в [9, 10] – 513–4097 кадров;

2) описание разработанного алгоритма можно легко расширить для случаев 4-х передающих и 8-ми приемных антенн в соответствии с методом ДПВБК (данное расширение алгоритма не вошло в объем статьи); также алгоритм, в случае необходимости, можно расширить для случаев запаздывания или опережения относительно начала кадра на время $t \pm 2$ и более;

3) данный алгоритм синхронизации не является отдельной структурной частью (как например методы [9, 10]) при реализации метода ДПВБК. По своей сути алгоритм основывается на методе ДПВБК и дополняет его, извлекая некоторые данные для дальнейшего расчета и обеспечения принятия решения о синхронизации (формулы (3), (6)–(7) входят в состав метода ДПВБК). В связи с этим данный алгоритм синхронизации является значительно менее вычислительно сложным, чем ранее предложенные;

4) при анализе зависимостей вероятности выхода из синхронизма (P_{er_sinch}) (рис. 1, 2) и вероятности ошибки принятых бит (BER) [1, рис. 6] возможно заключить, что разработанный алгоритм синхронизации является более помехоустойчив, чем метод ДПВБК. Пример: при QPSK, MIMO 2×2, $K=10; 20; 30; 40$, – P_{er_sinch} меньше BER на 5; 7; 8,3 и 8,5 дБ, соответственно.

4. Выводы

Предложенный в работе алгоритм «слепой» кадровой синхронизации для метода ДПВБК [1] является первым рассмотрением «слепой» кадровой синхронизации для дифференциальных ортогональных систем STBC. Данный алгоритм имеет преимущества по сравнению с подобными алгоритмами по необходимому количеству кадров для обеспечения синхронизации и вычислительной сложности, а также гибок к расширениям. Результатами моделирования подтверждается его способность к установлению кадровой синхронизации при условии низкого отношения сигнал/шум в системе и отсутствия необходимости знания о состоянии канала связи.

Литература

1. Tokar, M. S. (2018). *Diferencialnii metod blokovogo kodirovaniia dlia primeneniia v sistemakh MIMO. Sistemy sinkhronizacii, formirovaniia i obrabotki signalov, 1*, 147–159.

2. Meyr, H., Moeneclaey, M., Fechtel, S. (1998). *Digital communication receivers, synchronization, channel estimation, and signal processing*. John Wiley & Sons, Inc., 827. doi: <http://doi.org/10.1002/0471200573>

3. Rohde, U., Whitaker, J., Zahnd, H. (2017). *Communications Receivers: Principles and Design*. McGraw-Hill Education, 941.

4. Fomin, A. I. (2008). *Sinkhronizaciia cifrovyykh radiosistem peredachi informacii*. Moscow: SAINS-PRESS, 80.
5. Blahut, R. E. (2010). *Modem Theory: An Introduction to Telecommunications*. Cambridge University Press, 515. doi: <http://doi.org/10.1017/cbo9780511811401>
6. Nasir, A. A., Durrani, S., Mehrpouyan, H., Blostein, S. D., Kennedy, R. A. (2016). Timing and carrier synchronization in wireless communication systems: a survey and classification of research in the last 5 years. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016 (1), 180–218. doi: <http://doi.org/10.1186/s13638-016-0670-9>
7. Mahmood, A., Ashraf, M. I., Gidlund, M., Torsner, J., Sachs, J. (2019). Time Synchronization in 5G Wireless Edge: Requirements and Solutions for Critical-MTC. *IEEE Communications Magazine*, 57 (12), 45–51. doi: <http://doi.org/10.1109/mcom.001.1900379>
8. Volkov, L. N., Nemirovskii, M. S., Shinakov, Iu. S. (2005). *Sistemy cifrovoi radiosviazi: bazovye metody i kharakteristiki*. Moscow: Eko-Trendz, 392.
9. Marey, M., Dobre, O. A., Inkol, R. (2013). A Novel Blind Block Timing and Frequency Synchronization Algorithm for Alamouti STBC. *IEEE Communications Letters*, 17 (3), 569–572. doi: <http://doi.org/10.1109/lcomm.2013.13.122518>
10. Marey, M., Dobre, O. A., Liao, B. (2014). Second-Order Statistics-Based Blind Synchronization Algorithm for Two Receive-Antenna Orthogonal STBC Systems. *IEEE Communications Letters*, 18 (7), 1115–1118. doi: <http://doi.org/10.1109/lcomm.2014.2323245>

The object of this research is the methods and algorithms for frame synchronization used in multi-antenna radio systems (Multiple Input Multiple Output – MIMO). The implementation of radio communication systems and, in particular, MIMO, implies that the demodulator synchronizes the phase of the reference carrier and the time of signal processing processes. Time synchronization is divided into symbolic and frame synchronization. As for the synchronization of the reference carrier and symbol synchronization, these types of synchronization are provided by traditional methods and are not considered in this paper. The frame synchronization in the vast majority of cases is provided by the use of pilot signals (sync words). At their core, they are markers and are periodically embedded in the data stream to indicate the beginning of another new data block. The resources of the transmission system, spent on the transmission of pilot signals, are not used to transmit user information, as a result of which the efficiency of using the time-frequency resource of the system is degraded. To a lesser extent, there are so-called «blind» signal processing methods based on the redundancy properties of the transmitted signal. These methods have no drawbacks from the use of pilot signals and are divided into methods for assessing the state of the communication channel, signal identification, and synchronization. Based on this, such methods are of practical interest.

In this work, let's propose a frame synchronization method for demodulating differential space-time block coding signals using MIMO technology. The

synchronization algorithm does not require the use of preambles and sync words, which ensure efficient use of the time-frequency resource. An analysis of the structure of the algorithm and the simulation results show its performance at low signal-to-noise ratios in the transmission system. The algorithm does not require knowledge of the state of the communication channel, has low computational complexity compared to existing analogues, and allows implementation with a different number of transmitting and receiving antennas.

Keywords: *MIMO system, frame synchronization, pilot signal, time-frequency resource, blind signal processing method, space-time signal redundancy.*