

УДК: 519.816

DOI: 10.53816/23061456_2022_3-4_32

**МОДЕЛЬ ПОИСКА ПРОИЗВОДНОГО ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО
ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА МЕЖСПУТНИКОВЫХ РАДИОЛИНИЙ
РАЗНОВЫСОТНОЙ МНОГОСПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ**

**MODEL FOR SEARCHING FOR A DERIVATIVE OF A PHASE-MANIPULATED
BROADBAND SIGNAL OF INTERSATELLITE RADIO LINES
OF A MULTI-SATELLITE DIFFERENT HEIGHTS COMMUNICATION SYSTEMS**

*Канд. техн. наук Е.С. Абазина, канд. техн. наук С.Х. Зиннуров,
канд. техн. наук В.Е. Федосеев, канд. техн. наук А.Г. Шадрин*

Ph.D. E.S. Abazina, Ph.D. S.Kh. Zinnurov, Ph.D. V.E. Fedoseev, Ph.D. A.G. Shadrin

ВКА им. А.Ф. Можайского

Статья посвящена вопросам обеспечения устойчивости функционирования перспективных разнорысотных многоспутниковых систем связи за счет совершенствования технологии приема и обработки широкополосных сигналов, применяемых при организации информационного обмена. Авторами предложен подход, основанный на сокращении времени поиска сигнала при вхождении в синхронизм для каждой межспутниковой радиолнии. Достичь указанного эффекта возможно благодаря применению кодовой манипулирующей последовательности, генерируемой на основе двух производящих компонент. Предлагаемый в статье подход, нашедший отражение в модели поиска производного фазоманипулированного широкополосного сигнала межспутниковых радиолний разнорысотной многоспутниковой системы связи, позволяет сократить время поиска сигнала по задержке при выполнении требований к простоте генерации кодовой манипулирующей последовательности и высокой эквивалентной линейной сложности элементов ансамбля сигналов.

Ключевые слова: поиск широкополосных сигналов по задержке, псевдослучайные кодовые манипулирующие последовательности, межспутниковые радиолнии.

The paper is devoted to the issues of ensuring the functioning of promising multi-altitude multi-satellite communication systems stability by improving the receiving and processing broadband signals used in the organization of information exchange technology. The authors propose an approach to improving the stability of the multi-satellite communication systems functioning of different heights by reducing the time of signal search when entering into synchronism for each inter-satellite radio line. It is possible to achieve this effect due to the use of a code manipulating sequence generated on the basis of two generating components as a pseudorandom sequence. The approach proposed in the paper, which is reflected in the search model for a derivative of a phase-manipulated broadband signal of intersatellite radio lines of a multi-satellite communication system of different heights, reduces the time of signal search by delay when meeting the requirements for the simplicity of generating a code manipulating sequence and a high equivalent linear complexity of the elements of an ensemble of signals.

Keywords: search for broadband signals by delay, pseudo-random code manipulating sequences, inter-satellite radio lines.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации и за ее пределами крайне актуальна задача обеспечения оперативной связи мобильных абонентов различного типа базирования — наземного, морского, воздушного и космического, как между собой, так и с абонентами других существующих стационарных и мобильных сетей связи, использующих различные телекоммуникационные технологии. Одним из перспективных подходов к обеспечению такого всеобъемлющего высокоскоростного информационного обмена является использование системы спутниковой связи (ССС), космический сегмент которой строится в соответствии с концепцией разновысотной многоспутниковой системы связи (РМСС) [1–3]. Орбитальная группировка РМСС включает верхний и нижний уровни спутников-ретрансляторов (СР) на околополярных круговых орбитах разных высот. Связь между космическими аппаратами (КА), расположенными на орбитах как одного, так и разных уровней, организуется с использованием межспутниковых широкополосных радиолиний (рис. 1–3). Спектр информационных сигналов в радиолинии расширяется за счет фазовой манипуляции несущей по закону псевдослучайной последовательности (ПСП) со сверхбольшим периодом. Прием и обработка такого широкополосного сигнала (ШПС) осложнены тем, что он имеет неизвестные параметры — доплеровское смещение частоты, задержку, фазу и амплитуду. Для определения этих параметров в приемнике КА на этапе синхронизации выполняется поиск сигнала по частоте и задержке.

Очевидно, что задача поиска или вхождения в синхронизм наиболее актуальна для «постоянных» радиолиний переменной длины и временных межспутниковых радиолиний, где изменение параметров сигналов наиболее критично (рис. 2, 3).

Моделирование орбитальной группировки РМСС показывает, что сеансы связи между низко- и среднеорбитальным КА (периоды времени t) периодически прерываются из-за выхода спутников из зоны взаимной видимости (рис. 4).

Необходимость возобновления поиска также обусловлена значительным доплеровским смещением частоты в радиолинии между движущимися по орбитам КА (рис. 5).

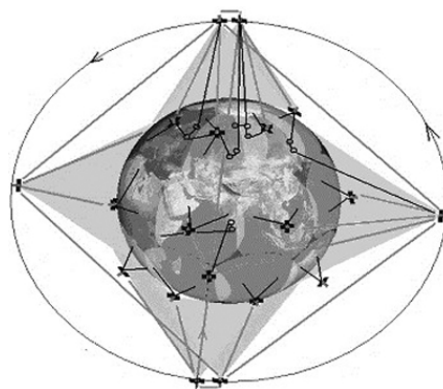


Рис. 1. Постоянные радиолинии фиксированной длины между 8 КА одной плоскости

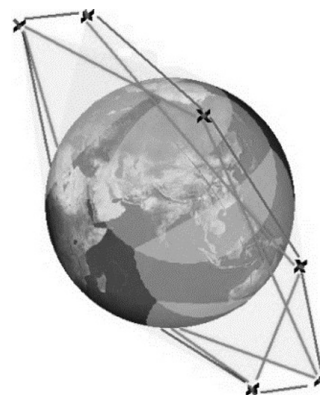


Рис. 2. Постоянные радиолинии фиксированной длины между 4 КА одной плоскости и переменной длины между космическими аппаратами в каждой из двух взаимно перпендикулярных плоскостей



Рис. 3. Временные межспутниковые радиолинии КА 1-го и 2-го уровней и фидерные радиолинии между КА 2-го уровня и приемо-передающим комплексом шлюзовых станций

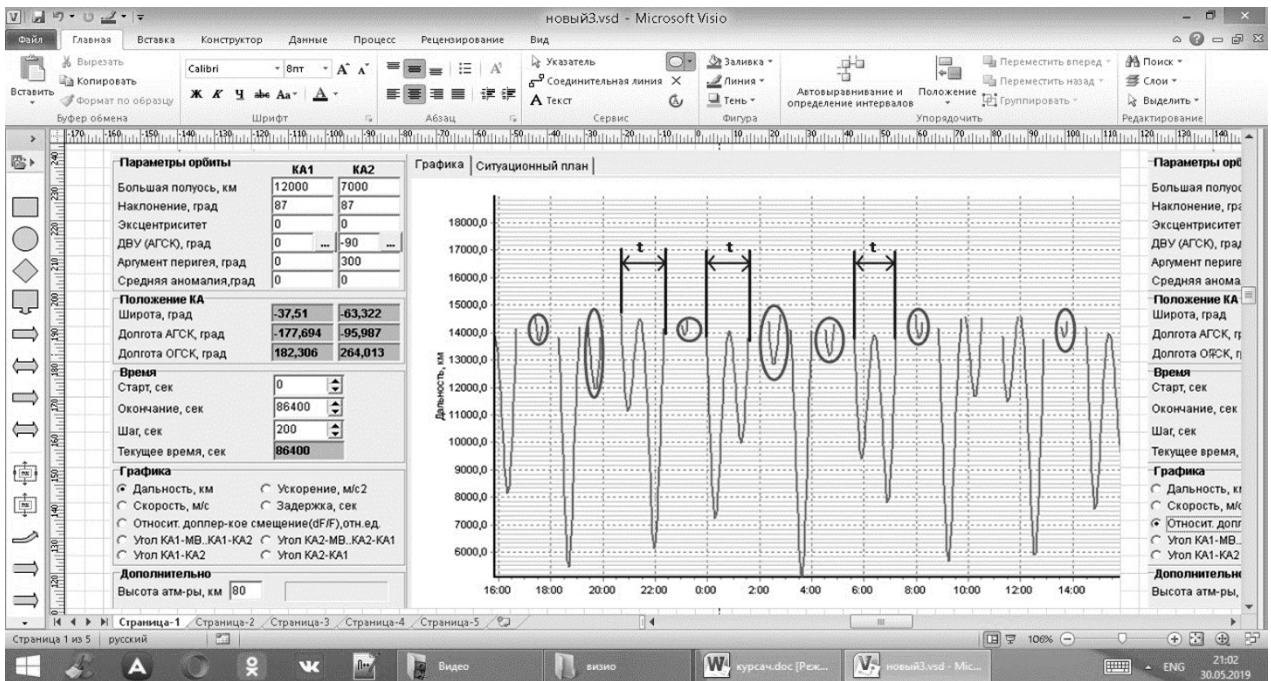


Рис. 4. Зависимость изменения протяженности межспутниковой радиолинии между низко- и среднеорбитальным КА

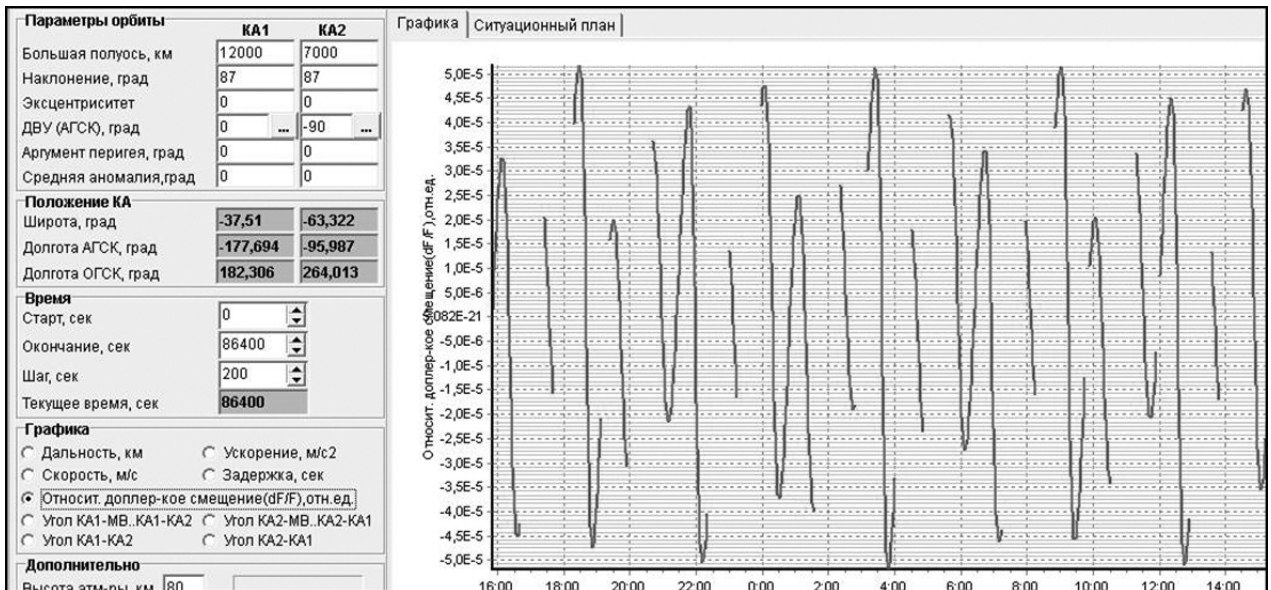


Рис. 5. Зависимость изменения доплеровского смещения частоты в межспутниковой радиолинии между низко- и среднеорбитальным КА

Таким образом, как показывают расчеты и результаты моделирования, в РМСС периодически возникает ситуация восстановления связи в межспутниковой радиолинии, что требует повторения процедуры вхождения в синхронизм бортовых систем слежения за частотой и задержкой принимаемого сигнала.

Постановка задачи

Для рассматриваемой структуры РМСС и условий ее функционирования крайне актуальна задача обеспечения высокой устойчивости системы, заключающаяся в сохранении функционирования сети электросвязи в различных усло-

виях, включая воздействие дестабилизирующих факторов физического или технологического характера [4]. Общие требования к устойчивости функционирования представляют собой совокупность требований к надежности и живучести.

В качестве показателя надежности каналов электросвязи применяется коэффициент готовности K_r канала электросвязи, определяемый выражением

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_b},$$

где T_0 — среднее время наработки на отказ канала электросвязи; T_b — среднее время восстановления работоспособности канала электросвязи.

В качестве показателя живучести каналов электросвязи применяют коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ канала электросвязи, определяемый выражением

$$K_{ог} = K_r \cdot P(T),$$

где K_r — коэффициент готовности; $P(T)$ — вероятность сохранения работоспособности канала электросвязи при воздействии дестабилизирующих факторов.

В Рекомендации МСЭ-R S.579 указано, что канал считается неготовым, если выравнивание синхронизации (или синхронизация) принимаемого цифрового сигнала пропадает на 10 секунд подряд или более. В [5] отдельно рассматривается понятие «готовности обслуживания пользователя» как доли в процентах, отводимой на синхронизацию по битам и восстановление готовности пользовательской функции (услуги связи).

Учтем, что в качестве критерия «не готовности» ОЦК принимается достижение коэффициентом ошибок по битам значения 10^{-3} в течение 10 последовательных секунд. Обнаружение факта неготовности канала реализуется только в состоянии синхронизации параметров приемника с принимаемым сигналом. При потере синхронизации восстановление канала потребует дополнительного среднего времени $T_{пс}$ повторной синхронизации, которое необходимо учесть при оценке устойчивости РМСС.

Пусть в системе связи при воздействии дестабилизирующих факторов восстановление канала осуществляется многократно N раз.

Тогда выражения для коэффициента готовности и оперативной готовности можно представить в виде

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + (T_{вол} + T_{пс})}, \quad (1)$$

$$K_{ог} = \frac{T_0}{T_0 + (T_{вол} + T_{пс})} \cdot P(T), \quad (2)$$

где $T_{вол}$ — среднее время восстановления функционирования оборудования и линии связи после каждого воздействия;

$T_{пс}$ — среднее время повторной синхронизации.

Выражения (1), (2) могут быть использованы для практической оценки связности между узлами РМСС. Для этого сеть связи моделируется графом сети, вершинами и ребрами которого являются узлы и линии связи. Всем элементам графа (вершинам и ребрам) присваивают весовые коэффициенты, представляющие собой коэффициенты готовности или коэффициенты оперативной готовности соответствующих узлов и линий связи.

В графе модели РМСС цепи будут взаимозависимы, т.е. имеют общие ребра и вершины. Связность p_{ij} между i -м и j -м узлами, как вероятность исправного состояния хотя бы одной цепи из всех возможных цепей или (при ограничении числа транзитных участков r_{wa}) хотя бы одной цепи с допустимым рангом, определяется выражением

$$p_{ij} = \left\{ p_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k \in m_{ij}} (1 - p_{ij}^k) \right\}, \quad (3)$$

где p_{ij}^k — связность k -го пути μ_{ij}^k из перечня всех цепей μ_{ij} между i -м и j -м узлами, т.е. совместная вероятность исправного состояния всех ребер и вершин, образующих эту цепь:

$$p_{ij} = \left\{ \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^k} K_{r_a} \right\}, \quad (4)$$

где K_{r_a} — коэффициент готовности (или оперативной готовности) a -го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащих пути μ_{ij}^k ;

μ_{ij}^k — k -я цепь из перечня всех простых цепей между выделенной парой i -го и j -го полюсов (узлов) сети (под «простой цепью» понимают последовательность ребер и вершин графа без петель и параллелей, замыкающую выбранные вершины между собой);

$E\{\dots\}$ — операция поглощения событий, при выполнении которой после раскрытия круглых скобок (...) под произведением Π все члены, имеющие показатели степени больше едини-

цы, заменяются на единицу, что соответствует исключению события многократного учета K_{Γ_a} одного ребра или одной вершины в условиях взаимозависимых цепей в графе сети. Число перемножаемых сомножителей равно числу простых цепей.

Общее выражение для оценки связности i -го и j -го узлов сети на основе выражений (1)–(4) и с учетом времени повторной синхронизации будет иметь вид:

$$p_{ij} = E \left\{ p_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k \in m_{ij}} \left(1 - \prod_{\forall a \in \mu_{ij}^k} K_{\Gamma_a} \left(\frac{T_{0a}}{T_{0a} + (T_{\text{вол}_a} + T_{\text{пс}_a})} \right) \right) \right\}.$$

Анализ данного выражения показывает, что одним из путей повышения устойчивости функционирования и связности РМСС является сокращение времени поиска сигнала (вхождения в синхронизм) $T_{\text{пс}}$ в каждой из межспутниковой радиолиний. Используемые методы поиска широкополосных сигналов достаточно разнообразны, а основные их типы и принципы реализации изложены в [6, 7]. Общеизвестно, что поиск сигнала традиционными структурами на основе корреляторов требует значительного времени, а сокращение времени поиска путем распараллеливания каналов требует слишком больших аппаратных затрат, что неприемлемо для малых КА и СР. Кроме того, этап поиска является наиболее уязвимым для постановки преднамеренных помех ввиду невозможности реализации преимуществ корреляционной обработки в условиях неизвестных параметров сигнала.

В основе поиска широкополосного сигнала по задержке лежит последовательный анализ его периодической автокорреляционной функции (ПАКФ), обнаружение главного пика которой соответствует устранению текущего временного рассогласования между принимаемым и опорным сигналом. Сокращение времени поиска сигнала по задержке возможно на основе использования на этапе синхронизации специальной ПСП, ПАКФ которой в ходе ее последовательного анализа в устройстве поиска сигнала позволит сократить анализируемую область неопределенности по задержке.

В данном исследовании предполагается, что на этапе синхронизации спектр ШПС сформирован в результате манипуляции фазы несущей,

заменяются на единицу, что соответствует исключению события многократного учета K_{Γ_a} одного ребра или одной вершины в условиях взаимозависимых цепей в графе сети. Число перемножаемых сомножителей равно числу простых цепей.

Общее выражение для оценки связности i -го и j -го узлов сети на основе выражений (1)–(4) и с учетом времени повторной синхронизации будет иметь вид:

щего колебания по закону производной кодовой манипулирующей последовательности (КМП). Генерация производной КМП посредством по-символьного суммирования «по модулю два» элементарных символов двух коротких производящих компонент определяет наличие в структуре ПАКФ выраженных боковых пиков двух типов, соответствующих синхронному состоянию с каждой из производящих компонент. Результаты исследования корреляционных свойств ПАКФ производных КМП приведены в предыдущей работе авторов на данную тему. В данной статье изложены выявленные взаимопределяющие особенности структуры производных и производящих КМП, позволяющие использовать закономерности ее ПАКФ для быстрого поиска сигнала по задержке. Также приведены результаты аналитико-имитационного моделирования процедуры поиска, свидетельствующие о возможности устранения рассогласования по задержке между принимаемым и опорным ШПС в результате анализа менее чем 20 периодов КМП.

Имитационное моделирование процедуры поиска производного фазоманипулированного широкополосного сигнала

В данном исследовании рассматриваются двукратные производные КМП, также называемые производными нелинейными рекуррентными последовательностями (ПНЛРП) [8]. Правило формирования двукратной (второго порядка) ПНЛРП W^2 , состоящей из L символов, на основе

двух производящих НЛРП вида V^j (где $j=1,2$), состоящих из l_j символов, имеет вид [8]

$$\begin{cases} W^2 = \{W_i^2 : i=0,1,\dots,L-1\}, \quad L = \frac{l_1 \cdot l_2}{k}, \quad (l_1 < l_2), \\ W_i^2 = V_{|l_1}^1 \oplus V_{|l_2}^2, \end{cases}$$

где k — наибольший общий делитель для длин l_i производящих НЛРП ($k=1$ при взаимно простых l_j); $V_{|l_i}^1$ — двоичный символ (0 или 1) производящей НЛРП с номером i , взятым по модулю ее длины l_1 .

В качестве производящих НЛРП выбраны известные нелинейные последовательности двух типов: коды квадратичных вычетов (ККВ) и характеристические коды [9].

В ходе исследования установлен важный для практического применения факт: формирование ПНЛРП из двух автоморфных преобразований (циклических сдвигов) c_1 и c_2 исходных производящих компонент с числом символов l_1 и $L/2$ соответственно, порождает ПНЛРП с определенным циклическим сдвигом C , значение которого связано со сдвигами c_1 и c_2 следующими соотношениями:

$$c_1 = l_1 - C(\text{mod } l_1); c_2 = l_2 - C(\text{mod } l_2), \quad (5)$$

где $C(\text{mod } l_1)$ — есть операция взятия числа C по модулю числа l_1 .

Установленная зависимость (5), а также наличие в структуре ПАКФ выраженных боковых пиков, определяемых производящими КМП,

свидетельствуют об уникальности текущего сочетания таких боковых пиков на периоде ПАКФ. Обнаружение боковых пиков ПАКФ в ходе поиска по задержке соответствует синхронизации устройства поиска с производящими компонентами. Зависимость (5) позволит в процессе поиска производного сигнала вычислять номер такта его истинной временной задержки по ранее выявленным тактам синхронизации с каждой из его производящих компонент.

Установление номеров тактов синхронизма с производящими компонентами возможно в ходе корреляционной обработки (согласованной фильтрации) принимаемого производного сигнала в двухканальном устройстве поиска, где опорные последовательности корреляторов (импульсные характеристики фильтров) соответствуют структуре КМП производящих компонент. Достоверное обнаружение состояния синхронизма с производящими компонентами по боковым пикам ПАКФ возможно за счет накопления значений автокорреляции с периодичностью длин производящих компонент и выбора тактов с максимальным накопленным значением. С целью обоснования возможности применения КМП для синхронизации в среде MathCAD проведено имитационное моделирование поиска двукратного производного фазоманипулированного ШПС.

В ходе моделирования принимаемый ШПС (ПНЛРП) поступает в устройство поиска, в каждом из двух каналов которого динамические согласованные фильтры предназначены для синхронизации по периоду каждой из производящих компонент (рис. 6). Импульсная характе-

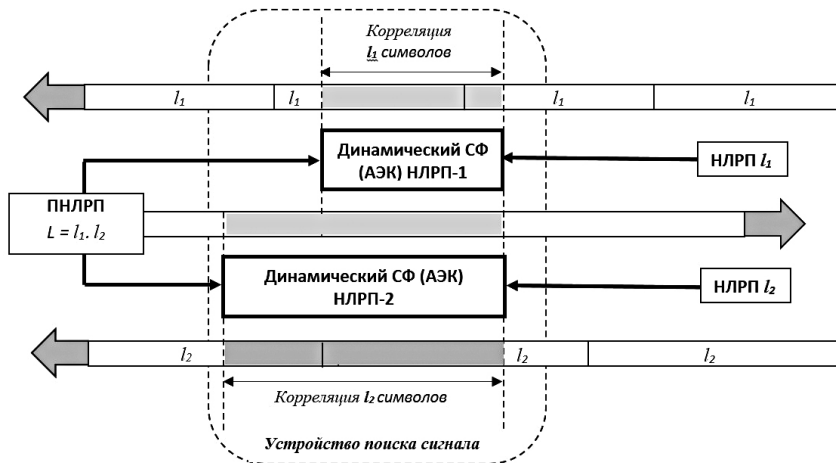


Рис. 6. Принцип двухканального поиска производного широкополосного сигнала

ристика динамических согласованных фильтров (типа акустоэлектронных конвольверов [10, 11]) обновляется с каждым тактом в соответствии со структурой циклически сдвигаемых опорных производящих компонент.

С момента случайного рассогласования во времени потактово фиксировалась степень взаимной корреляции (взаимокорреляционная функция, ВКФ) сегментов длиной l_1 и l_2 принимаемого производного фазоманипулированного сигнала с сегментами опорных последовательностей (НЛРП-1 и НЛРП-2) повторяющихся производящих компонент длиной l_1 и l_2 символов соответственно.

При этом с периодичностью длин l_1 и l_2 в соответствующих каналах производилось накопление значений ВКФ $R_{\Sigma 1j}$ и $R_{\Sigma 2j}$ ($j=1 \dots l_1$, $j=1 \dots l_2$). На тактах $i_{\max}$ и $j_{\max}$ от начала поиска происходит ярко выраженное накопление ВКФ с производящими НЛРП, приводящее к появлению двух максимальных значений $R_{\Sigma 1j_{\max}}$ и $R_{\Sigma 2j_{\max}}$ из l_1 и l_2 возможных, а номера тактов $i_{\max}$ и $j_{\max}$ характеризуют синхронизацию по задержке с производящими компонентами. Фиксация номеров тактов $i_{\max}$ и $j_{\max}$ осуществлялась по критерию максимума накопленной ВКФ. Для установления синфазного положения во времени принимаемый сигнал должен быть манипулирован по фазе ПНЛРП, циклически сдвинутой на C тактов (символов ПСП). Установлена зависимость значения C от значений $i_{\max}$ и $j_{\max}$, которая связывает указанные значения не напрямую, а посредством циклических сдвигов c_1 и c_2 исходных производящих компонент, согласно выражения (5), которые (c_1 и c_2) могут быть получены из выражений:

$$c_1 = \begin{cases} 2 \cdot (l_1 - i_{\max}), & \text{если } i_{\max} > \frac{l_1}{2}; \\ (l_1 - 2 \cdot i_{\max}), & \text{если } i_{\max} \leq \frac{l_1}{2}; \end{cases}$$

$$c_2 = \begin{cases} 2 \cdot (l_2 - j_{\max}), & \text{если } j_{\max} > \frac{l_2}{2}; \\ (l_2 - 2 \cdot j_{\max}), & \text{если } j_{\max} \leq \frac{l_2}{2}. \end{cases}$$

Вероятность правильной синхронизации P_{OC12} со всей производной ПСП равна произве-

дению вероятностей $P_{\Sigma 1\max}$ и $P_{\Sigma 2\max}$ правильного обнаружения в каждом канале тактов синхронизма с производящими компонентами:

$$P_{OC12} = P_{\Sigma 1\max} \cdot P_{\Sigma 2\max}.$$

В ходе моделирования получалась оценка вероятностей $P_{\Sigma 1\max}$ и $P_{\Sigma 2\max}$ на основе статистических оценок параметров нормального распределения накопленных значений ВКФ с использованием выражений:

$$P_{\Sigma 1\max} = \int_0^\infty f(R_{\Sigma 10}) \left[\prod_{i=1}^{l_1-1} \int_{-\infty}^{R_{\Sigma 10}} f(R_{\Sigma 1i}) dR_{\Sigma 1i} \right] dR_{\Sigma 10};$$

$$P_{\Sigma 2\max} = \int_0^\infty f(R_{\Sigma 20}) \left[\prod_{j=1}^{l_2-1} \int_{-\infty}^{R_{\Sigma 20}} f(R_{\Sigma 2j}) dR_{\Sigma 2j} \right] dR_{\Sigma 20},$$

где $f(R_{\Sigma 10})$ и $f(R_{\Sigma 20})$ — плотности распределения вероятностей накопленных в каналах значений ПВКФ в «нулевых» тактах, т.е. в тактах синхронизма с производящими компонентами; $f(R_{\Sigma 1i})$ и $f(R_{\Sigma 2j})$ — плотности распределения вероятностей в тактах «несинхронного» состояния.

Зависимости оценок P_{OC12} вероятности правильного обнаружения синхронизма по задержке принимаемого ФМ-сигнала, манипулированного ПНЛРП с производящими компонентами $l_1 = 11$ и $l_2 = 19$ от числа полных периодов поиска представлены на рис. 7. Приведены графики

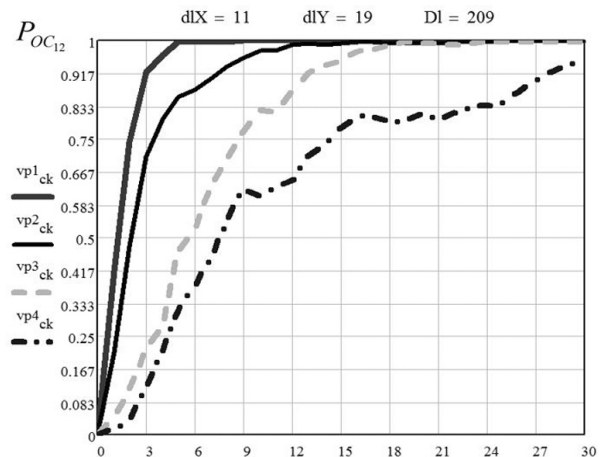


Рис. 7. Оценка вероятностей правильной синхронизации по задержке производного сигнала

для четырех уровней моделируемой аддитивной гауссовской помехи, воздействующей на фазоманипулированный широкополосный сигнал.

Приведенные зависимости показывают возможность достоверной синхронизации по задержке ПНЛРП с числом символов $L = 209$ в результате анализа в течение от шести до двадцати (в зависимости от уровня помехи) периодов широкополосного синхросигнала, что существенно меньше (в десятки раз) по сравнению с простым последовательным поиском по задержке при одинаковом значении области неопределенности и отношении сигнал/шум [12, 13].

Важно отметить, что моделирование двухканального поиска сигнала с использованием статических согласованных фильтров в каждом из каналов, настроенных на неизменную структуру производящих компонент, также подтверждает возможность использования приведенных ранее особенностей структуры производных сигналов для сокращения времени синхронизации.

Заключение

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что использование корреляционных свойств и особенностей структуры ПАКФ производных КМП, обусловленных использованием при их генерации двух производящих компонент, позволяет сократить время поиска сигнала по задержке в широкополосной радиолинии до значений менее 20 периодов принимаемого сигнала. Учитывая необходимость удовлетворения комплекса требований к свойствам ШПС важно отметить, что применение псевдослучайных сочетаний различных кодовых форм (изоморфизмов) двух исходных производящих компонент обеспечит простоту генерирования и прогнозируемо высокий объем ансамбля системы производных ШПС. Это сочетается с высокой оценкой эквивалентной линейной сложности элементов такого ансамбля сигналов, равной половине числа ее символов $L/2$, что соответствует высокой структурной скрытности производных КМП.

Таким образом, применение в межспутниковых радиолиниях РМСС производных КМП для формирования ансамбля широкополосных сигналов позволит обеспечить их высокую готов-

ность и связность за счет сокращения времени поиска сигнала по задержке в сочетании с высокой структурной скрытностью.

Литература

1. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов А.Ф., Ефимов С.Н., Викторов Е.А. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: баллистическое построение // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2012. Вып. № 634. С. 45–56.
2. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмоллов А.Ф., Ефимов С.Н., Викторов Е.А. Концепция построения разнорысотной многоспутниковой системы связи с мобильными абонентами: варианты реализации бортового коммуникационного оборудования спутника-ретранслятора // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2012. Вып. № 635. С. 5–13.
3. Цветков К.Ю., Акмоллов А.Ф., Викторов Е.А. Модель канала управления передачей смешанного трафика речи и данных в разнорысотной системе спутниковой связи // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 63–70.
4. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. — М.: Стандартинформ. 2019. 16 с.
5. Рекомендация МСЭ-R.S.1522-1 Воздействие потери времени восстановления синхронизации на готовность в гипотетических эталонных цифровых трактах.
6. Варакин Л.Е. Системы связи с ШПС. — М.: Радио и связь. 1985. 205 с.
7. Ипатов В.Г. и др. Поиск, обнаружение и измерение параметров в радионавигационных системах. — М.: Сов. Радио. 1975. 174 с.
8. Сныткин И.И. Теория и практическое применение сложных сигналов с нелинейной структурой. — МО СССР: 4 ч. 1988. 451 с.
9. Пелехатый М.И. О последовательностях квадратичных вычетов с наилучшими автокорреляционными свойствами // Радиотехника и электроника. 1971. Т. 16. № 5. С. 30–35.
10. Долгов В.И. и др. Применение акустоэлектронных конвольверов для обработки сигналов в технике связи // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № 8. С. 38–45.

11. Кузичкин А.В. Последовательный конвольверный поиск псевдослучайных сигналов большой длительности // Радиотехника. 1983. № 10. С. 101–110.

12. Журавлёв В.И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах. — М.: Радио и связь. 1986. 204 с.

13. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. — СПб.: Наука и техника. 2005. 400 с.

References

1. Tsvetkov K.Yu., Rodionov A.V., Akmolov A.F., Efimov S.N., Viktorov E.A. The concept of building a multi-altitude multi-satellite communication system with mobile subscribers: ballistic construction // Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. 2012. № 634. P. 45–56.

2. Tsvetkov K.Yu., Rodionov A.V., Akmolov A.F., Efimov S.N., Viktorov E.A. The concept of building a multi-satellite multi-satellite communication system with mobile subscribers: options for the implementation of on-board communication equipment of a repeater satellite // Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. 2012. № 635 P. 5–13.

3. Tsvetkov K.Yu., Akmolov A.F., Viktorov E.A. Model of a channel for controlling the transmission of mixed speech and data traffic in a multi-altitude satellite communication system // Information and control systems. 2012. № 3. P. 63–70.

4. GOST R 53111-2008 Stability of the functioning of the public communication network. Requirements and verification methods. — М.: Standartinform. 2019. 16 p.

5. Recommendation ITU-R.S.1522-1 The impact of loss of synchronization recovery time on readiness in hypothetical reference digital paths.

6. Varakin L.E. Communication systems with SHPS. — М.: Radio and Communications. 1985. 205 p.

7. Ipatov V.G. et al. Search, detection and measurement of parameters in radio navigation systems. — М.: Sov. Radio. 1975. 174 p.

8. Snytkin I.I. Theory and practical application of complex signals with a nonlinear structure. — МО: 4 parts. 1988. 451 p.

9. Pelekhaty M.I. On sequences of quadratic residues with the best autocorrelation properties // Radio Engineering and Electronics. Vol. 16. № 5. 1971. P. 30–35.

10. Dolgov V.I. et al. Application of acousto-electronic convolvers for signal processing in communication technology // Foreign Radio Electronics. № 8. 1990. P. 38–45

11. Kuzichkin A.V. Sequential convolver search for pseudorandom signals of long duration // Radio Engineering. № 10. 1983. P. 101–110.

12. Zhuravlev V.I. Search and synchronization in broadband systems. — М.: Radio and Communications. 1986. 204 p.

13. Gantmacher V.E., Bystrov N.E., Chebotarev D.V. Noise-like signals. Analysis, synthesis, processing. — St. Petersburg: Science and Technology. 2005. 400 p.