

DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-66-74

УДК 621.396.6

А. С. Маругин, В. К. Орлов, Р. Р. Хазиахметова  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)  
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

### ПОИСК ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

**Аннотация.** Объектом исследования является процедура поиска сигнала радионавигационной системы наземного базирования, использующей шумоподобные дискретные сигналы с большой базой. Проведен сравнительный анализ качественных показателей поиска сигнала как наиболее трудоемкой и времязатратной процедуры при различных модуляционных форматах навигационного сигнала в наихудших для потребителя условиях и при ограниченном частотном ресурсе, выделенном системе.

Повышение спектральной эффективности сигналов, используемых радиотехническими системами (РТС) в условиях жестких требований обеспечения электромагнитной совместимости, практически реализуемо разумным выбором способа манипуляции шумоподобного сигнала (ШПС). В связи с этим особую значимость приобретают полосно-эффективные способы манипуляции ШПС, для которых достигается постоянство огибающей сигнала. Среди методов формирования ШПС наиболее распространены фазовые, амплитудно-фазовые и амплитудные. Однако колебания последних двух названных методов предъявляют повышенные требования к линейности приемного и передающего трактов РТС и не позволяют достичь единичного значения пик-фактора, т. е. равенства средней и мгновенной мощностей излучаемого сигнала, что приводит к снижению эффективности утилизации энергоресурса системы. Поэтому для формирования ШПС в первую очередь должна быть рассмотрена фазовая манипуляция (ФМ) и как альтернатива ей – минимальная частотная манипуляция (МЧМ).

Проанализирована полосная эффективность ШПС с МЧМ и ФМ, получены соотношения для среднего максимального времени поиска навигационного сигнала (средней продолжительности поисковой процедуры в наихудших для потребителя навигационной информации условиях) при фиксированной вероятности правильного завершения поиска. Сопоставлены качественные показатели поисковой процедуры для МЧМ и ФМ при одинаковой полосной эффективности и одинаковой длительности элементарных символов.

По результатам анализа показано, что в условиях равноценных ограничений на занимаемый частотный диапазон и при одинаковых требованиях к достоверности поисковой процедуры поиск МЧМ ШПС эффективен и осуществим при существенно меньших временных затратах, чем ШПС с традиционной бинарной ФМ.

**Ключевые слова:** радионавигационная система, минимальная частотная манипуляция, фазовая манипуляция, радиомаяк, радионавигационный параметр, шумоподобный сигнал, электромагнитная совместимость, периодические дискретные сигналы

**Для цитирования:** Маругин А. С., Орлов В. К., Хазиахметова Р. Р. Поиск широкополосного сигнала радионавигационной системы // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 66–74. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-66-74

Aleksey S. Marugin, Vladimir K. Orlov, Rumiya R. Khaziakhmetova  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

### RADIO NAVIGATION SYSTEM BROADBAND SIGNAL SEARCH

**Abstract.** The study object is the search procedure for a ground-based radionavigation system signal using noise-like discrete signals with a long baseline. A comparative analysis of the signal search quality indicators is carried out, which is

*the most time-consuming procedure with different navigation signal modulation formats in the worst-case conditions and with a limited frequency resource allocated to the system.*

*Bandwidth efficiency of noise-like signals (NLS) with phase shift keying (PSK) and minimal frequency shift keying (MFSK) are analyzed. Relations are obtained for the average maximum search time of the navigation signal with a fixed probability of correct search completion. The qualitative indicators of the search procedure for PSK and MFSK are compared for the same band pass effectiveness and elementary symbol duration.*

*The analysis results show that under the conditions of equal restrictions on the occupied frequency range and the same requirements for the search procedure reliability, NLS MFSK search is effective and implementable at much lower time costs than NLS with traditional binary PSK.*

**Key words:** radionavigation system, minimum frequency shift keying, phase shift keying, radio beacon, radio navigation parameter, noise-like signal, electromagnetic compatibility, periodic discrete signals

**For citation:** Marugin A. S., Orlov V. K., Khaziakhmetova R. R. Radio Navigation System Broadband Signal Search. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 6, pp. 66–74. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-66-74 (In Russian)

**Введение.** Современные тенденции развития радиотехнических систем координатометрии состоят в динамичном развитии и проникновении на потребительский рынок радионавигационных систем (РНС) космического базирования [1]. Достижение практически потенциальных точностных характеристик, возможность круглосуточно-всепогодного и глобального определения координат, декларируемые разработчиками и производителями системы GPS (NAVSTAR), созданной в США, и российской системы ГЛОНАСС, предопределили высокую востребованность этих РНС.

Одновременно со становлением и развитием средств координатометрии продолжается дальнейшее усовершенствование РНС наземного базирования, к показателям которых в настоящее время предъявляются существенно более жесткие требования, чем к тактико-техническим характеристикам систем, разработанных до создания РНС ГЛОНАСС и GPS.

Наземные РНС в настоящее время могут являться высокоэффективным средством, дающим возможность многочисленным гражданским и военным пользователям реализовывать сложные задачи позиционирования (как независимо, так и при комплексировании с космическими РНС) [2]–[4]. Особенная значимость современных наземных РНС предопределяется: достижимой высокой точностью измерения пространственных и скоростных координат пользователей, необходимых при решении задач как военного, так и гражданского характера; большим радиусом действия; скрытностью систем, высокой крипто- и имитостойкостью; высокой мобильностью и оперативностью установки геодезически привязанных радиомаяков систем; сравнительно невысокой стоимостью эксплуатации и изготовления, чрезвы-

чайно большой устойчивостью при возникновении локальных и глобальных военных конфликтов.

Целью исследований, представленных в настоящей статье, является сопоставление модуляционных форматов навигационных сигналов как традиционно применяемых в современных радионавигационных системах позиционирования (бинарная фазовая манипуляция), так и обладающих высокой эффективностью использования частотного ресурса (минимальная частотная манипуляция), с точки зрения осуществления наиболее ресурсоемкой процедуры поиска сигнала РНС. Исследования осуществлялись для наиболее неблагоприятной для потребителей ситуации нахождения сжатого при обработке навигационного сигнала в конце априорного интервала неопределенности по времени. В этом случае в роли количественных показателей, характеризующих эффективность поисковой процедуры, выступает среднее максимальное время поиска  $\bar{t}_{п\max}$  при заданной вероятности правильного завершения  $P_{пр}$ .

**Поиск широкополосного сигнала РНС.** Основная проблема современных и разрабатываемых перспективных РНС состоит в гарантированном предоставлении многочисленным потребителям этих систем возможности получить высокоточное решение задачи координатометрии при одновременной реализации высокой скрытности, помехозащищенности, электромагнитной совместимости (ЭМС) и криптозащищенности с одновременно существующими в эфире радиосистемами.

Вся совокупность показателей может быть реализована лишь при использовании для навигационных измерений дискретных шумоподобных сигналов (ШПС), которые помимо возможности достижения потенциальных тактических

показателей системы позволяют существенно улучшить энергетический режим передающей аппаратуры, обеспечивая единичное значение пик-фактора, т. е. равенство пиковой и средней излучаемых мощностей, благодаря чему в значительной мере снижаются требования к линейности выходных каскадов передатчика.

Шумоподобными (сложными, широкополосными) сигналами называют колебания, напоминающие реализации широкополосного случайного процесса, т. е. такие, у которых интервал корреляции значительно меньше длительности самого сигнала [8]. Сигналы РНС как наземного, так и космического базирования, таких, как Декка, Омега, Транзит и др., не соответствующие широкополосной концепции, концентрирующие энергию навигационных колебаний в узком спектральном диапазоне, в значительной степени не обеспечивают значения параметров, соответствующие современным жестким требованиям [1].

Радионавигационные сигналы широкополосных РНС формируются за счет дополнительной кодовой модуляции, поэтому для их передачи необходима существенно бóльшая частотная полоса. Распределение энергии навигационного колебания по времени и по спектру и придание ему сходства с реализациями широкополосного случайного процесса позволяет свести к минимуму признаки и последствия наличия в эфире РНС. Это соответствует интересам радиосистем, для которых характерна задача повышения скрытности (анонимности) работы, поскольку сокрытие спектра навигационного сигнала под спектром естественных шумов затрудняет его обнаружение. Кроме того, системы, соседствующие в отведенном частотном ресурсе, не воздействуя друг на друга сильными импульсными помехами улучшает их ЭМС, что повышает шансы на взаимное бесконфликтное сосуществование. Наконец, при эффективном кодировании доступ к навигационной информации могут получить только санкционированные потребители. Использование ШПС позволяет практически достичь потенциальной точности одновременного измерения дальности и скорости динамичных объектов.

В настоящее время известны как наземные, так и космические РНС, работающие в различных частотных диапазонах и использующие для местоопределения пользователей ШПС. Базовые показатели ряда из них представлены в табл. 1.

Наиболее перспективное направление интеграции наземных и космических РНС связано с синхронизацией временной и частотной шкал наземных радиомаяков по сигналам навигационных спутников. Примером этого могут служить РНС LORAN-C (отечественный аналог – РНС "Чайка"), GeoLoc (Франция) и разрабатываемая российская РНС "Спрут", использующие ШПС. Реализация синхронизации наземных станций по сигналам навигационных спутников оказалась возможной благодаря созданию стандартов времени и частоты с относительной нестабильностью менее  $10^{-13}$ , что позволяет излучать навигационные сигналы синхронно в результате привязки к единой шкале времени [1]–[8].

Развитие современных широкополосных РНС характеризуется освоением эффективных видов модуляции сигналов, в наибольшей степени отвечающих возросшим требованиям к тактико-техническим характеристикам таких систем. Тем не менее, в силу сложившихся стереотипов наиболее распространенными среди сигналов радиоизмерительных систем, эксплуатируемых в настоящее время, остаются ШПС с бинарной фазовой манипуляцией (ФМ), чрезвычайно неэкономно использующие частотный диапазон. Проведенный в [8]–[15] анализ перспективных видов модуляции позволяет сделать вывод, что конкуренцию указанному способу модуляции навигационного сигнала может составить минимальная частотная манипуляция (МЧМ), которая практически полностью (в типичном диапазоне требований МККР) реализует потенциал использования отведенного участка радиочастотного спектра при умеренной сложности построения аппаратуры формирования и обработки подобных сигналов.

Далее в настоящей статье проведено сопоставление качественных показателей работы РНС, использующих указанные виды модуляции, по критерию трудоемкости осуществления поисковой процедуры.

Таблица 1

Название РНС	Страна-разработчик	Частотный диапазон	Дальность, км	Точность, м	Источник информации
Spot	США	1.6...1.8 МГц	740	До 10	[1]
GeoLoc	Франция	2 МГц	1000	$2 + 1.5 \cdot 10^{-5} R$	[4]
"Спрут"	Россия	2...3 МГц	1000	До 10	[1], [6]
GPS	США	1.2/1.5 ГГц	Глобальная РНС	10/100	[1]
ГЛОНАСС	Россия	1.10...1.61 ГГц	Глобальная РНС	5...10	[7]

Одной из важных задач, решаемых приемо-измерительной аппаратурой РНС, является поиск сигналов, эффективность которого во многом определяет такие характеристики системы, как время вхождения в синхронизм с сигналом передающей станции и время до первой обсервации. Процедура поиска по существу сводится к грубому (с погрешностью, приемлемой для последующего ввода следящих измерителей) измерению временного положения сигнала в заданном априорном интервале в предположении, что сигнал в этом интервале присутствует [16].

Широко известны разнообразные подходы к анализу поисковых процедур, а также их параметрической оптимизации с целью снижения временных затрат при фиксированной вероятности правильного результата и ограниченном аппаратном ресурсе [1], [8], [16]. В то же время проблема выбора полосно-эффективного способа манипуляции навигационного сигнала дает повод вернуться к решению задачи поиска сигнала и выявить среди ФМ и МЧМ ШПС предпочтительный с точки зрения показателей эффективности указанной процедуры.

Учитывая, что точность определения временного положения при поиске невелика, допустимо считать, что в пределах априорного интервала протяженности  $T_a$  сигнал может занимать конечное число позиций  $\tau_i = (i-1)T_{ш}$ , где  $T_{ш}$  – шаг поиска. Тогда  $m = T_a/T_{ш}$  – число анализируемых на априорном интервале точек. Оптимальным правилом распознавания, максимизирующим вероятность правильного решения, в этом случае будет одновременное вычисление значений корреляций между сигналами передающих станций и опорными сигналами приемника для всех  $m$  позиций и принятие решения по наибольшему из них. Однако при больших значениях  $m$ , характерных для радионавигации, реализация подобной процедуры может оказаться затруднительной. Поэтому на практике наибольшее распространение получили алгоритмы поиска, в которых за факт наличия сигнала в  $i$ -й точке принимается превышение порога соответствующим корреляционным интервалом. При этом могут использоваться параллельный, параллельно-последовательный и последовательный способы поиска [16].

Рассмотрим простейшую из поисковых процедур – последовательную (одноканальную) с фиксированным временем анализа в точке  $t_a$ . При этом устройство поиска реализуется с наименьшими аппаратно-программными затратами,

а процедура поиска сводится к поочередному, шаг за шагом, просмотру  $m$  точек априорного интервала. Каждый шаг этого просмотра реализуется как классическая задача обнаружения отрезка ШПС фиксированной длительности  $T_a$ , и первое же решение об обнаружении сигнала в какой-либо точке завершает процедуру поиска. При рассмотрении будем ориентироваться на ситуацию, когда сигнал имеет максимально возможное априори запаздывание (находится на правом краю априорного интервала). При этом показателем эффективности поисковой процедуры может служить среднее максимальное время поиска  $\bar{t}_{п\max}$  при фиксированной вероятности правильного исхода  $P_{пр}$ , т. е. временные затраты, вычисленные с учетом возможности ошибочного результата поиска (остановки в точке, не содержащей сигнала) и повторных циклов поиска (пропусков сигнала, после которых априорный интервал просматривается вновь). Выражение для  $\bar{t}_{п\max}$  при условии, что сигнал занимает лишь одну  $m$ -ю точку временного априорного интервала, приведено в [16].

Такой подход адекватен ситуации, когда длительность  $T_s$  автокорреляционной функции (АКФ) элементарного дискрета ШПС меньше шага поиска  $T_{ш}$ . Далее рассмотрено обобщение результатов [16] на случай, когда  $T_s \geq T_{ш}$ , т. е. "сигнальными" являются несколько точек априорного интервала, сосредоточенных на его правом краю (рис. 1). Поскольку МЧМ представима как разновидность ФМ [8], спецификой которой является косинусоидальная форма элементарных импульсов, следующих друг за другом с перекрытием, при законах кодирования ШПС, обеспечивающих пренебрежимый уровень боковых лепестков АКФ, различие показателей поиска для МЧМ и ФМ может быть обусловлено лишь разной формой основного лепестка АКФ каждого из них.

Пусть сигнал расположен в точке с запаздыванием  $\tau_c$  и допустимой ошибкой считается его обнару-

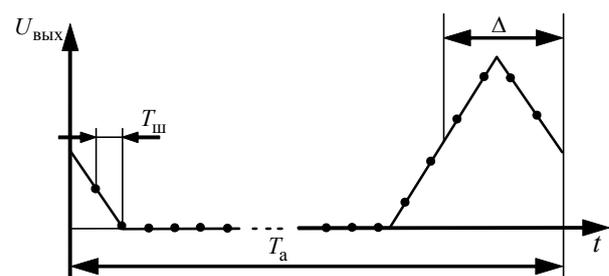


Рис. 1

жение в интервале шириной  $\Delta$ , симметричном относительно  $\tau_c$  (рис. 1). Тогда правильным окончанием поиска считается обнаружение сигнала в точках области обнаружения, принадлежащих интервалу  $T_0 = (\tau_c - \Delta/2, \tau_c + \Delta/2)$ , а ложным – его обнаружение в остальных точках  $T_a$ . Вероятность окончания поиска на одном цикле, т. е. при однократном анализе  $m$  точек априорного интервала, определяется как

$$P_{ц} = 1 - (1 - \alpha)^{(m-n)} \prod_{k=1}^n \beta_k, \quad (1)$$

а вероятность правильного окончания поиска на одном цикле – как

$$P_{ц.пр} = (1 - \alpha)^{(m-n)} \prod_{k=1}^l \beta_k \left( 1 - \prod_{k=l+1}^n \beta_k \right), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – вероятность ложной тревоги в точках отсутствия сигнала;  $\beta_k$  – вероятность пропуска сигнала в  $k$ -й сигнальной точке;  $n$  и  $l$  – номера сигнальных точек, в которых обнаружение сигнала принимается за ложное и правильное (окончание поиска) соответственно.

На основании (1) и (2) вероятность правильного окончания поиска составляет:

$$\begin{aligned} P_{пр} &= P_{ц.пр} \sum_{j=1}^{\infty} (1 - P_{ц})^{j-1} = \frac{P_{ц.пр}}{P_{ц}} = \\ &= \frac{(1 - \alpha)^{(m-n)} \prod_{k=1}^l \beta_k \left( 1 - \prod_{k=l+1}^n \beta_k \right)}{1 - (1 - \alpha)^{(m-n)} \prod_{k=1}^n \beta_k}. \end{aligned} \quad (3)$$

На каждом цикле может произойти одно из трех событий: ложное окончание поиска, правильное окончание поиска и незавершение поиска с вероятностями  $P_{ц.л}$ ,  $P_{ц.пр}$ ,  $P_{ц.н}$  соответственно. Требуемой высокой достоверности поиска  $P_{пр} \approx 1$  можно достичь лишь при  $P_{ц.л} \ll P_{ц.пр}$ . Кроме того на практике, как правило, ширина априорного интервала  $T_a$  значительно превышает протяженность основного пика АКФ ШПС. Поэтому средняя длительность одного цикла поиска  $\bar{t}_{ц} \approx m t_a$ , где  $t_a$  – время анализа в одной точке.

Учитывая, что  $\bar{t}_{ц \max} = \bar{n}_{ц} \bar{t}_{ц}$  ( $\bar{n}_{ц} = 1/P_{ц}$  – среднее число циклов до завершения поиска [16]), имеем:

$$\bar{t}_{ц \max} = \frac{m t_a}{1 - (1 - \alpha)^{(m-n)} \prod_{k=1}^n \beta_k} \approx \frac{m t_a}{1 - \prod_{k=l+1}^n \beta_k},$$

где в последнем приближении вновь использовано требование близости  $P_{пр}$  к единице, т. е.

$$P_{ц.л} = 1 - (1 - \alpha)^{(m-n)} \prod_{k=1}^l \beta_k \rightarrow 0.$$

Время анализа в точке  $t_a = q^2/\gamma$ , где  $q$  – отношение "сигнал/шум" на выходе устройства сжатия ШПС;  $\gamma$  – энергетический потенциал радиолонии – отношение средней мощности ШПС к двусторонней спектральной плотности аддитивного гауссовского шума на входе приемного устройства. Тогда:

$$\bar{t}_{ц \max} = \frac{q^2 m}{\gamma \left( 1 - \prod_{k=l+1}^n \beta_k \right)}. \quad (4)$$

На основании (3) и (4) проведены расчеты зависимости  $\bar{t}_{ц \max}/(m/\gamma) = f(q, P_{пр})$  для МЧМ и ФМ ШПС. При этом для заданного значения отношения "сигнал/шум"  $q$  на выходе устройства сжатия значения  $\alpha$  и  $\beta_k$  ( $k = \overline{1, n}$ ) подбирались таким образом, чтобы сохранить неизменной вероятность правильного завершения поиска  $P_{пр}$ .

Поскольку в радионавигации при осуществлении операции поиска сигнал представим последовательностью импульсов с неизвестной начальной фазой, то вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала в  $k$ -й сигнальной точке определяются соотношениями

$$\alpha = \exp(-R^2/2); \quad \beta_k = Q(R, q_k),$$

где  $R$  – нормированный к среднеквадратическому значению шума на выходе устройства сжатия ШПС порог обнаружения;  $Q(R, q_k)$  – табулированная функция распределения Рэлея–Райса (функция Маркума);  $q_k$  – отношение "сигнал/шум" в  $k$ -й сигнальной точке.

При расчетах использовалось представление функции Маркума в виде ряда [17], [18]:

$$\begin{aligned} Q(x, y) &= 1 - \exp\left[-(x^2 + y^2)/2\right] \times \\ &\times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(x^2/2)^k}{k!} \sum_{n=0}^k \frac{(y^2/2)^n}{n!}. \end{aligned}$$

Допустимая ошибка поиска  $\Delta$  для обоих типов рассматриваемых ШПС полагалась равной длительности элементарной посылки МЧМ-сигнала  $T_{\text{МЧМ}}$ .

На рис. 2 приведена структурная схема алгоритма расчета качественных показателей поисковой процедуры. Выполнение алгоритма сводится к отысканию значений  $\alpha$  и  $\beta_k$ , удовлетворяющих требуемому значению вероятности правильного завершения поиска  $P_{\text{пр}}$  с заданной точностью  $\varepsilon$ .

Задача решается за счет изменения порогового уровня обнаружителя, который итерационно увеличивается от 0 до значения, гарантирующего выполнение условия  $P_{\text{пр}} < P_{\text{пр}}$ . Для достижения

заданной точности используется метод дихотомии, благодаря чему удается приблизиться к значению порога, удовлетворяющему условию  $|P_{\text{пр}} - P_{\text{пр}}| < \varepsilon$ . Далее для найденных значений  $\alpha$

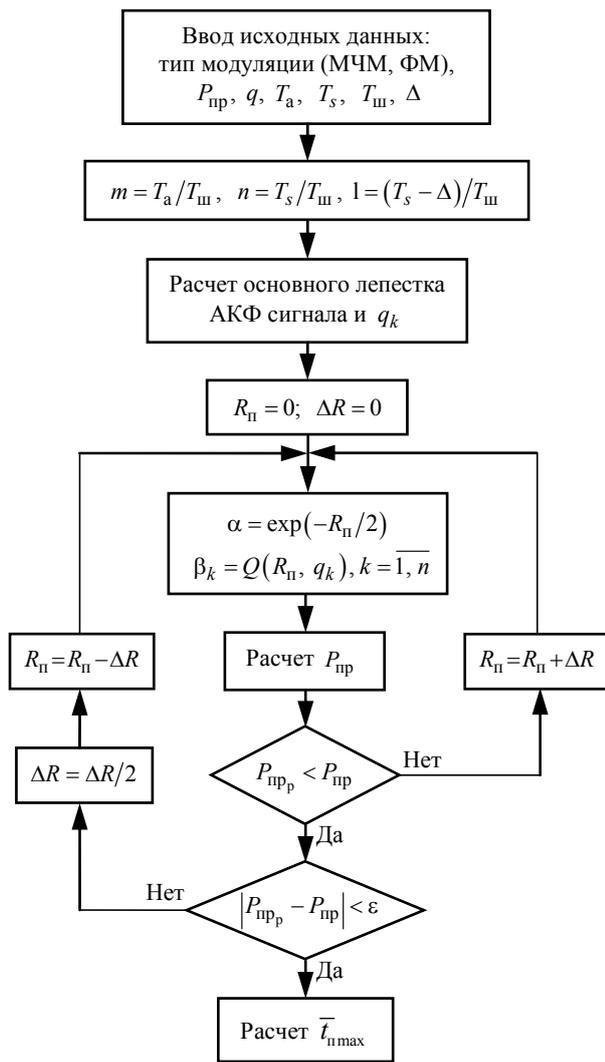


Рис. 2

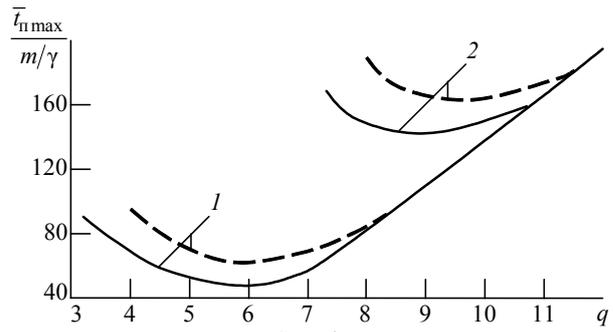


Рис. 3

и  $\beta_k$  рассчитывается максимальная продолжительность поисковой процедуры  $\bar{t}_{\text{пmax}}$ .

На рис. 3 представлены зависимости  $\bar{t}_{\text{пmax}}/(m/\gamma) = f(q, P_{\text{пр}})$  для МЧМ (кривые 1) и ФМ (кривые 2) ШПС при  $P_{\text{пр}} = 0.99$  (сплошные линии) и 0.999 (штриховые линии) и условии концентрации 99 % энергии сигналов в одной и той же полосе частот. Для соблюдения последнего условия длительности элементарных импульсов должны соотноситься как  $T_{\text{ФМ}} = 16.7 T_{\text{МЧМ}}$ . Значительно большее время поиска ФМ ШПС по сравнению с МЧМ объясняется заметно большей шириной основного пика АКФ ФМ-сигнала по сравнению с МЧМ-сигналом при одинаковой полосе частот. Последнее при одинаковой точности поиска  $\Delta$  приводит к возрастанию вероятности ложного окончания поиска в сигнальных точках, не принадлежащих интервалу  $T_0$ . При этом для сохранения равной с МЧМ вероятности правильного окончания поиска  $P_{\text{пр}}$  требуется увеличение отношения "сигнал/шум", т. е. времени анализа в точке.

Преимущество МЧМ ШПС (меньшее значение  $\bar{t}_{\text{пmax}}$ ) сохраняется и при условии постоянства длительности элемента  $T_{\text{ш}} = T_{\text{ФМ}} = T_{\text{МЧМ}}$  и одинаковом в силу этого числе точек анализа  $m$  (рис. 4). Это объясняется большей "прямоугольно-

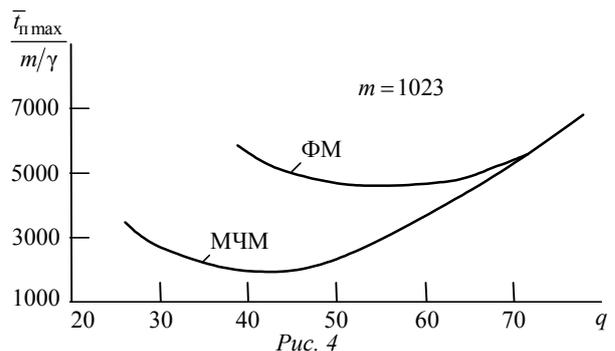


Рис. 4

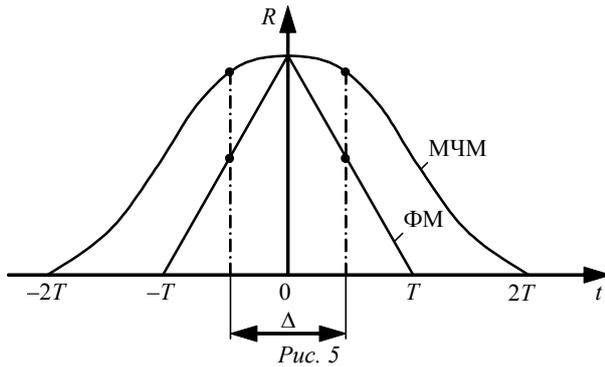


Рис. 5

Таблица 2

Режим	$P_{пр}$	$m$					
		100	200	500	1000	2000	5000
$T_{ФМ} = 16.7T_{МЧМ}$	0.99	60.01	55.68	50.94	47.84	45.11	42.14
	0.999	80.13	75.59	71.55	67.95	64.71	61.77
$T_{ФМ} = T_{МЧМ}$	0.99	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41
	0.999	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41

стью" основного пика АКФ МЧМ-сигнала (рис. 5, маркерами отмечены точки, где принимаются решения об окончании или продолжении поиска при  $T_{ФМ} = T_{МЧМ}$  и наихудшей с точки зрения потребителя фазировке опорного и принятого сигналов).

Расчеты, проведенные при  $m = 500$  и  $2000$ , показали, что характер зависимостей

$$\bar{t}_{пmax} / (m/\gamma) = f(q, P_{пр})$$

для обоих типов манипуляции остается тем же, что и на рис. 3, 4, в широком диапазоне значений  $m$ .

В табл. 2 приведены значения выигрыша во времени поиска  $\eta = \bar{t}_{пmax,ФМ} / \bar{t}_{пmax,МЧМ}$  при замене ФМ на МЧМ ШПС для различных значений числа анализируемых точек интервала априорной неопределенности по времени  $m$  при заданной вероятности правильного завершения процедуры  $P_{пр}$  и рассмотренных ранее в статье режимах равной полосной эффективности и равной длительности элементарного символа ФМ и МЧМ ШПС.

Итак, в условиях равноценных ограничений на занимаемый частотный диапазон и при одинаковых требованиях к достоверности поисковой процедуры поиск МЧМ ШПС осуществим при существенно меньших временных затратах, чем ШПС с традиционной бинарной ФМ.

**Заключение.** Подводя итоги можно отметить, что наземные РНС на сегодняшний день представляют собой эффективное средство, дающее возможность многочисленным гражданским и военным пользователям выполнять (как независимо, так и при комплексировании с космическими системами) сложные задачи определения пространственных и скоростных координат. Необычайная значимость этих систем предопределена достижением практически потенциальной точности измерения координат пользователей, необходимой для решения ряда задач как военного, так и гражданского характера. Все эти требования могут быть реализованы на основе использования в качестве навигационных колебаний дискретных ШПС. С другой стороны, при перегруженности эфира многочисленными колебаниями различных радиотехнических систем весьма актуальным требованием является эффективность использования частотного ресурса.

В результате исследований получены соотношения для среднего максимального времени поиска навигационного сигнала при фиксированной вероятности правильного завершения поиска. По полученным соотношениям сопоставлены качественные показатели поисковой процедуры для МЧМ и ФМ ШПС при одинаковой полосной эффективности и одинаковой длительности элементарных символов. Показано, что МЧМ в любых условиях обеспечивает меньшее время поиска в сравнении с ФМ. При этом выигрыш от использования навигационных колебаний с МЧМ может достигать более чем 80 раз при одинаковой полосной эффективности, а в случае одинаковой длительности элементарных символов ШПС выигрыш достигает практически 2.5 раз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиотехнические системы / под ред. Ю. М. Казакина. М.: Изд. центр "Академия", 2008. 592 с.
2. Бондаренко В. Н., Кокорин В. И. Широкополосные радионавигационные системы с шумоподобными частотно-манипулированными сигналами. Новосибирск: Наука, 2011. 260 с.
3. Marehal A. W. Spot Radiopositioning System as a Range-Limiting Factor // Sea Technology. 2013. Vol. 26, № 3. P.16–18.
4. Nard G. Geoloc. Spread Spectrum Concept Applied in New Accurate Medium-Long Range Radiopositioning System. Nantes: Sercel, 2015. 72 p.

5. Сафонов А. В. Повышение точности местопредопределения радионавигационных систем средне-волнового диапазона: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Моск. акад. рынка труда и информационных технологий. М., 2004. 26 с.
6. Хазиахметова Р. Р. Широкополосная концепция в современных системах радионавигации // НТК "Наука настоящего и будущего", СПб., 22–24 марта 2018. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2018. С. 278–282.
7. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

8. Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.

9. Хачатурян А. Б. Синтез спектрально-эффективных сигналов для навигационных интерфейсов нового поколения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ "ЛЭТИ". СПб., 2014. 19 с.

10. Макаров С. Б., Цикин И. А. Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.

11. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

12. Ипатов В. П., Хачатурян А. Б. Эффективность спектрально-компактных сигналов с учетом преднамеренных и межсистемных помех // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 4. С. 6–11.

13. URL: <http://digteh.ru/UGFSvSPS/modul/MSK/> (дата обращения 21.08.2018).

14. Ipatov V. P., Shebshaevich B. V. Designing Spectrally-Compact Signals for Satellite Navigation Air Inter-

Статья поступила в редакцию 12 октября 2018 г.

face / Proc. of the 5th China Satellite Navigation Conf. CSNC'2014, Nanjing, China, May 21–23 2014., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P. 112–118.

15. Ипатов В. П., Игнатъев Ф. В., Хачатурян А. Б. Модуляция с непрерывной фазой как инструмент улучшения компактности спектра сигналов спутниковой навигации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 28–36.

16. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Сов. радио, 1975. 296 с.

17. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 720 с.

18. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М.: Наука, 1979. 832 с.

**Маругин Алексей Сергеевич** – кандидат технических наук (1994), доцент (2000) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 40 научных публикаций. Сфера научных интересов – статистическая теория связи; широкополосные системы радиолокации, радионавигации и передачи данных; теория сигналов.

E-mail: [asm\\_etu@mail.ru](mailto:asm_etu@mail.ru)

**Орлов Владимир Константинович** – кандидат технических наук (1984), профессор (2017) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация и радионавигация; теория связи.

E-mail: [v.k.orloff@gmail.com](mailto:v.k.orloff@gmail.com)

**Хазиахметова Румия Равильевна** – студентка 4-го курса бакалавриата по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – широкополосные системы радионавигации и передачи данных; теория сигналов.

E-mail: [rumik.08.97@gmail.com](mailto:rumik.08.97@gmail.com)

## REFERENCES

1. Radiotekhnicheskie sistemy [Radio systems]. Ed. by Yu. M. Kazarinov. Moscow, *Akademiya*, 2008, 592 p. (In Russian)

2. Bondarenko V. N., Kokorin V. I. *Shirokopolosnyye radionavigatsionnyye sistemy s shumopodobnymi chastotno-manipulirovannymi signalami* [Broadband Radionavigation Systems with Noise-Like Frequency-Manipulated Signals]. Novosibirsk, *Nauka*, 2011, 260 p. (In Russian)

3. Marehal A. W. Spot Radiopositioning System as a Range-Limiting Factor. *Sea Technology*. 2013, vol. 26, no. 3, pp.16–18.

4. Nard G. Geoloc. Spread Spectrum Concept Applied in New Accurate Medium-Long Range Radiopositioning System. France: Sercel, 2015, 72 p.

5. Safonov A. V. *Povyshenie tochnosti mestoopredeleniya radionavigatsionnykh sistem srednevolnovogo diapazona. Avto-ref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving Accuracy of Positioning for Medium Wave Range Radio Navigation Systems]. Moscow, 2004, p. 26. (In Russian)

6. Khaziakhmetova R. R. *Shirokopolosnaya kontseptsiya v sovremennykh sistemakh radionavigatsii* [Broadband Concept in Modern Radio Navigation Systems]. STC "Science of the present and future" 22–24 march 2018. Collection of conference materials, 2018, pp. 278–282. (In Russian)

7. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of Construction and Functioning]. Ed. by A. I. Perov, V. N. Kharisov. 4th ed. Moscow, *Radio-tekhnik*, 2010, 800 p. (In Russian)

8. Ipatov V. P. *Periodicheskie diskretnye signaly s optimal'nymi korrelyatsionnymi svoystvami* [Periodic Discrete Signals with Optimal Correlation Properties]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1992, 152 p. (In Russian)

9. Khachaturyan A. B. *Sintez spektral'no-effektivnykh signalov dlya navigatsionnykh interfeisov novogo pokoleniya. Avto-ref. diss. ... kand. tekhn.nauk* [Synthesis of Spectral-Efficient Signals for New-Generation Navigation Interfaces]. SPb., *izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2014, p. 19. (In Russian)

10. Makarov S. B., Tsikin I. A. *Peredacha diskretnykh soobshchenii po radiokanalam s ogranichennoi polosoi propuskaniya* [Discrete Message Transmission over Radio Channels with Limited Bandwidth]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1988, 304 p. (In Russian)

11. Prokis Dzh. *Tsifrovaya svyaz'* [Digital Communication]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 2000, 800 p. (In Russian)

12. Ipatov V. P., Khachatryan A. B. Efficiency of Spectral-Compact Signals in View of Intentional and Intersystem Noise. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2015, no. 4, pp. 6–11. (In Russian)

13. Available at: <http://digteh.ru/UGFSvSPS/modul/MSK/> (accessed 21.08.2018)

14. Ipatov V. P., Shebshaevich B. V. Designing Spectrurn-Compact Signals for Satellite Navigation Air Interface. Proc. of the 5th China Satellite Navigation Conference CSNC'2014, Nanjing, China, May 21-23 2014, pp. 112–118.

15. Ipatov V. P., Ignatiev F. V., Khachatryan A. B. Continuous Phase Modulation as a Tool for Improving

Received October, 12, 2018

---

Satellite Navigation Signals Spectrum Compactness. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2012, no. 4, pp. 28–36. (In Russian).

16. *Poisk, obnaruzhenie i izmerenie parametrov signalov v radionavigatsionnykh sistemakh* [Search, Detection and Measurement of Signal Parameters in Radio Navigation Systems]. Ed. by Yu. M. Kazarinov. Moscow, *Sov. radio*, 1975, 296 p. (In Russian)

17. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Mathematics Handbook (for Scientists and Engineers)]. Moscow, *Nauka*, 1974, 720 p. (In Russian)

18. *Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Special Functions Handbook with Formulas, Graphs and Mathematical Tables]. Ed. by M. Abramovits, I. Stigan. Moscow, *Nauka*, 1979, 832 p. (In Russian)

**Aleksey S. Marugin** – Ph.D. in Engineering (1994), Associate Professor (2000) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: statistical communication theory; broadband radar, radionavigation and data transmission systems; signal theory.

E-mail: [asm\\_etu@mail.ru](mailto:asm_etu@mail.ru)

**Vladimir K. Orlov** – Ph.D. in Engineering (1984), Associate Professor (1994), Professor (2017) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: radar and radio navigation; communication theory.

E-mail: [v.k.orloff@gmail.com](mailto:v.k.orloff@gmail.com)

**Rumiya R. Khaziakhmetova** – Bachelor's Degree student of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 1 scientific publications. Area of expertise: broadband radionavigation and data transmission systems; signal theory.

E-mail: [rumik.08.97@gmail.com](mailto:rumik.08.97@gmail.com)

---