УДК 621.391.82

ОБНАРУЖЕНИЕ PRACH-СИГНАЛА СТАНДАРТА GSM НА ФОНЕ ПОМЕХ

Рогожников Е.В., *к.т.н., заведующий кафедрой ТУСУР, e-mail: evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru*
Савенко К.В., *ТУСУР, младший научный сотрудник, e-mail: kirill.savenko@tusur.ru*
Дмитриев Э.М., *к.т.н., ТУСУР, старший преподаватель, e-mail: edgar.dmitriev@tusur.ru*
Иванников Н.А., *НТИ ЦКБСИВ, м.н.с., e-mail: ivannikoy0201@mail.ru*
Порваткин Р.А., *НТИ ЦКБСИВ, м.н.с, e-mail: porvatkin2001@gmail.com*
Гридин И.В., *НТИ ЦКБСИВ, м.н.с., e-mail: vanyagridin2001@bk.ru*
Жапова Д.Ж., *НТИ ЦКБСИВ, м.н.с., e-mail: dragondarima2001@mail.ru*

DETECTION OF GSM STANDARD SIGNAL IN THE BACKGROUND OF INTERFERENCE

Rogozhnikov E.V., Savenko K.V., Dmitriyev E., Ivannikov N.A., Porvatkin R.A., Gridin I.V., Zhapova D.Z.

The task of detecting signals against a background of noise remains one of the key problems in the field of digital communications. Various methods of correlation processing are used to solve this problem. The paper considers three types of correlation receivers: classical, iconic, and a receiver that calculates a cross-correlation function in the frequency domain. In order to study correlation receivers, a simulation was performed in the MATLAB programming environment and the probability of correct detection was compared with different signal-to-noise ratios for each approach.

Key words: correlation, correlation receiver, GSM, PRACH, adaptive threshold, DSP, FPGA.

Ключевые слова: корреляция, корреляционный приемник, GSM, PRACH, адаптивный порог, DSP, ПЛИС.

Задача обнаружения сигналов на фоне шумов остается одной из ключевых проблем в области цифровых коммуникаций. Для решения данной задачи используются различные методы корреляционной обработки. В работе рассматриваются три типа корреляционных приемников: классический, знаковый, а также приемник, вычисляющий взаимную корреляционную функцию в частотной области. С целью исследования корреляционных приёмников было проведено моделирование в среде программирования MATLAB и проведено сравнение вероятности правильного обнаружения при различных отношениях сигнал-шум для каждого из подходов.

Введение

В рамках научно-исследовательской работы «Разработка программно-аппаратного комплекса для поиска в лесном массиве потерявшегося человека с устройством мобильной связи», проводимой молодежной проектной командой Передовой Инженерной Школы «Электронное приборостроение и системы связи» имени А.В. Кобзева исследуется способ использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с базовой станцией стандарта GSM 900 на борту для помощи поисковым службам. Суть данного способа заключается в следующем: БПЛА пролетает над лесным массивом, позволяя мобильным устройствам, не зарегистрированным в сети, подключиться к этой временной базовой станции [1]. Чтобы определить наличие абонента и зарегистрировать его, вычисляется корреляция между полученным сигналом и известным сигналом PRACH (Physical Random Access Channel, физический канал случайного доступа). Это позволяет эффективно обнаружить потерявшихся людей в лесном массиве через их мобильные устройства связи.

Дополнительное обнаружение PRACH сигнала посредством ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) используется для предотвращения ситуаций, когда мобильное устройство отправляет запрос на подключение, но не получает ответа. Если БПЛА пролетел, а абонент не успел подключиться к сети при детектировании PRACH сигнала на физическом уровне, БПЛА замедляется или возвращается обратно и повторно проверяет связь с абонентом. Это значительно повышает шансы на успешное установление контакта с потерявшимся человеком.

Как известно, системы мобильной связи функционируют в условиях воздействия разнообразных мешающих факторов, таких как шумы, многолучевое распространение и другие виды помех. Эти факторы снижают качество принимаемого сигнала, ухудшая общую эффективность обнаружения сигнала PRACH. Устранение помех является одной из главных задач, в которой применяются методы, основанные на различии структуры опорного сигнала и шумовых компонентов.

В работе рассматривалось решение задачи посредством корреляционного приёмника.

Корреляционный приемник сравнивает принятый сигнал с заранее известным опорным сигналом. Сравнение осуществляется путем вычисления коэффициента взаимной корреляции $R(t)$ принятого сигнала $s(t)$ и опорного сигнала $s_p(t)$ за время передачи одного символа T:

$$R(t) = \int_0^T [s(t) \cdot s_p(t) dt]. \quad (1)$$

Хотя математическое выражение выглядит простым,

реализация алгоритма в аппаратном обеспечении сопряжена с определенными трудностями. Согласно выражению (1) необходимо выполнять операцию умножения, которая требует значительного количества специализированных блоков умножения или большого объема логических элементов в случае использования ПЛИС, что увеличивает затраты на оборудование и снижает его энергоэффективность. Для решения задачи в ПЛИС применяются альтернативные алгоритмы корреляционного анализа, требующие меньшего количества аппаратных ресурсов. В данном исследовании рассматриваются их ключевые достоинства и недостатки.

Описание канала PRACH

В современном мире мобильной связи стандарт GSM 900 играет важную роль в обеспечении надежной и эффективной передачи данных. Одним из аспектов стандарта является использование общего транспортного физического канала в восходящей линии связи, известного как PRACH, который используется для инициализации соединения между мобильным телефоном и базовой станцией. Канал предназначен для передачи коротких контрольных сообщений, таких как запросы на соединение или индикация готовности к передаче данных. PRACH канал используется для установления начального соединения между мобильным устройством и сетью, что позволяет мобильным устройствам получить доступ к базовой станции для передачи и приема данных. Следует отметить, что в данной статье под выражением «PRACH сигнал» подразумевается совокупность сигналов, которые передаются в PRACH канале.

Процесс обработки сигнала в этом канале представлен на рисунке 1.

Блок 1 в данной схеме содержит в себе 8 информационных бит и 6 контрольных бит, блок 2 отвечает за коррекцию ошибок (перемежение), блок 3, используя сверточный код, кодирует всю последовательность с кодовой скоростью 1/2; в блоке 4 производится формирования пакета; блок 5 отвечает за модуляцию [2]-[4].

Сообщения PRACH могут быть переданы в нулевом слоте каждого кадра в пределах мультикадра, согласно структуре, представленной на рисунке 2. Так как длительность одного кадра составляет 4,615 мс, то длительность мультикадра равна: $4,615 \cdot 51 = 235,365$ мс.

Таким образом сообщение канала PRACH передается мобильной станцией один раз в 235,365 мс.



Рисунок 1 – Процесс обработки сигнала в PRACH канале

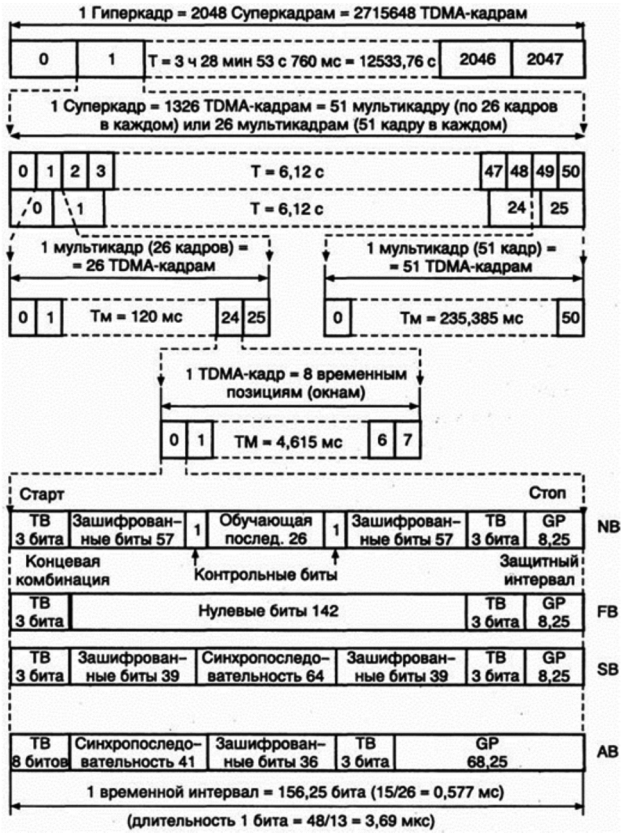


Рисунок 2 – Структура кадра стандарта GSM 900

Описание методов корреляции

Наиболее часто встречающимся видом корреляционных приемников является корреляционный приемник, который основан на умножении входного сигнала на отсчеты опорного сигнала. Этот приемник принято называть классическим. Структурная схема подобного корреляционного приемника при реализации на ПЛИС представлена на рисунке 3 [6].

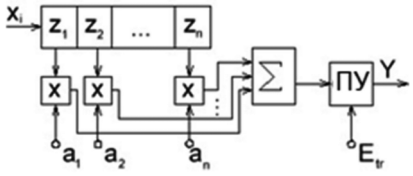


Рисунок 3 – Классический корреляционный приемник

Отчеты сигнала x_i подаются на вход сдвигового регистра z. Затем каждый отчет регистра z умножается на соответствующие отсчеты PRACH сигнала a_n. Результаты этих произведений направляются на вход сумматора. После этого вычисленное значение передается на пороговое устройство (ПУ), которое принимает решение о наличии или отсутствии сигнала в каждый такт работы устройства.

Схема реализует расчет корреляции без упрощений (согласно формуле 1), благодаря чему такой тип приемника отличается высокой точностью. Однако, как видно на рисунке 3, он требует большого количества блоков умножения, зависящего от размера преамбулы, что существенно увеличивает требования к аппаратной части. Для данного способа преамбула (PRACH) имеет длину 54 значения, разрядностью по 4 бита каждое.

Для реализации данного метода корреляционного приемника на ПЛИС требуется 208 четырехразрядных регистров и 54 байта памяти для хранения преамбулы, также для дальнейших расчетов понадобиться 209 DSP блоков.

Также возможна реализация корреляционного приемника без применения блоков умножения. Схема такого приемника приведена на рисунке 4.

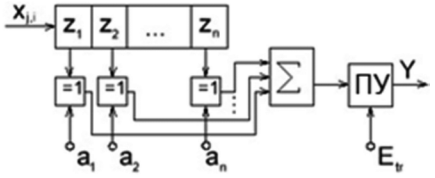


Рисунок 4 – Знаковый корреляционный приемник

Как показано на рисунке 4, на вход знакового корреляционного приемника поступают знаковые разряды отчетов сигнала $x_{j,i}$. Затем выполняется сравнение знаковых отчетов PRACH сигнала a_n с соответствующими значениями регистра z, результаты этого сравнения поступают на вход сумматора. Подобно классическому корреляционному приемнику, итог суммы передается на ПУ, где, исходя из установленного порога E_{tr}, принимается решение о наличие или отсутствии сигнала PRACH.

Такое упрощение приводит к существенному снижению точности обнаружения корреляционного пика, что может вызывать ошибки обнаружения. Тем не менее, этот подход позволяет реализовать корреляционный приемник на более доступной аппаратной плат форме, что особенно полезно в условиях ограниченных ресурсов и невысоких требований к точности.

Для реализации этого приемника на ПЛИС требуется 208 регистров для записи только знаковой части преамбулы и 14 байт памяти, кроме того, для вычислений не требуются DSP блоки.

Так же имеется корреляционный приемник, построенный по структурной схеме, которая представлена на рисунке 5 [7]. Отличительной особенностью данного корреляционного приемника является вычисление взаимной корреляционной функции не во временной, а в частотной области.

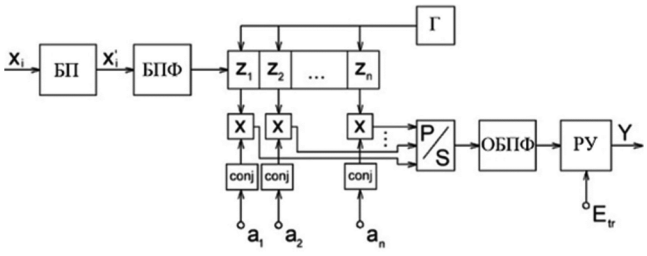


Рисунок 5 – Структурная схема корреляционного приемника, работающего в частотной области

На вход корреляционного приемника (рисунок 5) поступают отсчеты входного сигнала x_i, которые накапливаются в буферной памяти (БП), далее производится операция быстрого преобразования Фурье (БПФ). Полученные значения поступают в ячейки z_i сдвигового регистра z. Значение каждой ячейки перемножается с комплексно-сопряженным значением a_i^* отсчетов опорного сигнала a_i. В отличие от корреляционного приемника, построенного по схеме, которая представлена на рисунке 3, отсчеты a_i являются представлением опорного сигнала в частотной области. Далее происходит параллельно-последовательное преобразование результатов перемножения, и данные отсчеты поступают на вход блока обратного БПФ. Значения с выхода данного блока поступают на решающее устройство, в котором принимается решение о наличии или отсутствии сигнала на входе корреляционного приемника.

$$Y = \begin{cases} 1, \sum_{k=0}^{N-1} (a_i^* \cdot z_i) \cdot e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \geq E_{tr} \\ 0, \sum_{k=0}^{N-1} (a_i^* \cdot z_i) \cdot e^{\frac{j2\pi nk}{N}} < E_{tr} \end{cases}. \quad (2)$$

Недостатком данного корреляционного приемника является большая задержка при вычислении взаимной корреляционной функции и, в связи с этим, необходимость применения буферной памяти. Её размер определяется количеством отсчетов в БПФ. Также наличие блоков прямого и обратного преобразования Фурье увеличивает количество используемых DSP блоков до 256, 208 четырехразрядных регистров, а для хранения преамбулы и буфера входных значений используется и 208 байт памяти.

Моделирование корреляционных приёмников

Для ПУ был реализован алгоритм, который определяет порог, позволяющий уменьшить количество неверных срабатываний коррелятора, а также позволяет динамически подстраиваться к уровню входного сигнала. Суть алгоритма определения порога заключается в следующем: фильтр рассчитывает значение порога как среднее значение корреляции $y(n)$, полученное путем суммирования всех значений корреляций в каждый момент времени x_{n-i} и деления результата на размер фильтра M, а после полученное значение умножается на коэффициент W, который был получен экспериментальным путем:

$$y(n) = W \cdot \left(\frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x(n-i) \right). \quad (3)$$

Для определения порогов исследуемых корреляторов была создана модель, структурная схема которой представленная на рисунке 6.

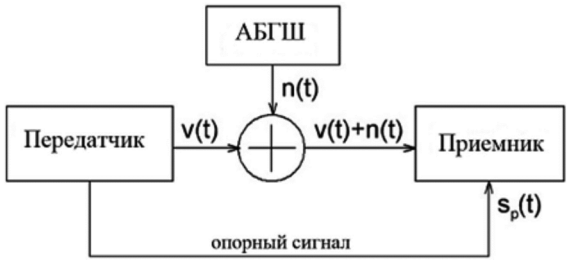


Рисунок 6 – Структурная схема модели исследования

Параметры сигналов, используемых при моделировании, имеют следующие значения: диапазон отношений сигнал-шум от -5 дБ до 5 дБ, количество PRACH

сигналов, переданных при каждом отношении сигнал шум – 10000, размер опорного сигнала – 54 отсчета.

Результат расчета корреляции с адаптивным порогом представлен на рисунке 7.

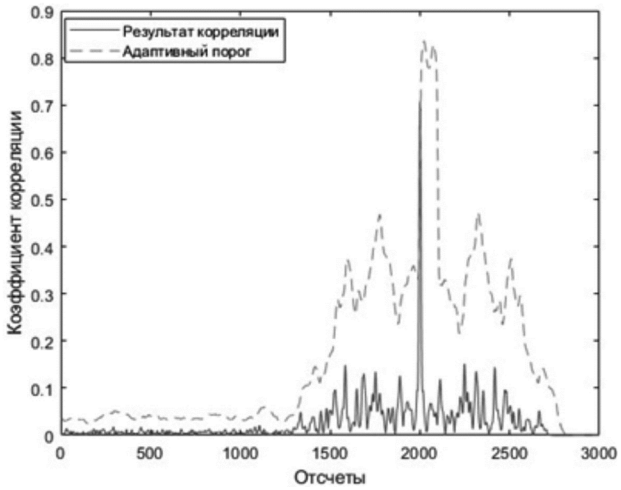


Рисунок 7 – Результат пика корреляции относительно адаптивного порога

В передатчике была сформирована последовательность из N PRACH сигналов, а для передачи этой последовательности использовался канал с АБГШ (аддитивный белый гауссовский шум). При этом последовательность была сформирована таким образом, что события наличия на входе приемника суммы PRACH сигнала с шумом либо только шума были равновероятны. В приемнике выносились решения о наличии или отсутствии сигнала при разных значениях порога, затем данные решения сравнивались с истинными. В результате для каждого отношения сигнал шум были определены вероятности правильного обнаружения. Результаты проведенных исследований представлены на рисунках 8 и 9 и в таблицах 1 и 2.

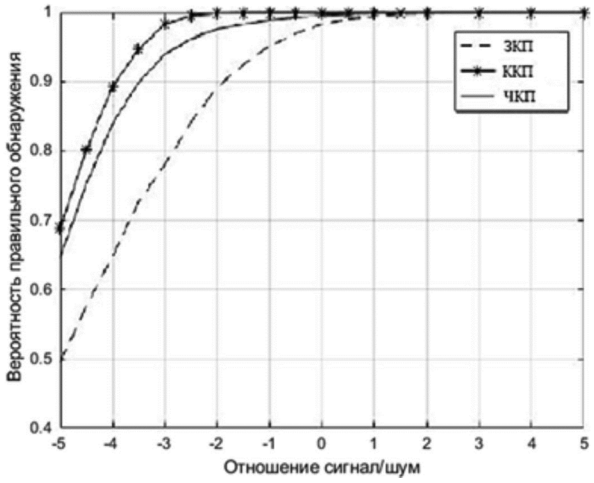


Рисунок 8 – Зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал-шум для классического корреляционного приемника (ККП), знакового корреляционного приемника (ЗКП), частотного корреляционного приемника (ЧКП)

Как показали результаты моделирования (рисунок 8) и (таблица 1), вероятность правильного обнаружения сигнала превышает 95 % при отношениях сигнал-шум более 0 дБ для ЗКП, -1.5 дБ для ЧКП, -2 дБ для ККП.

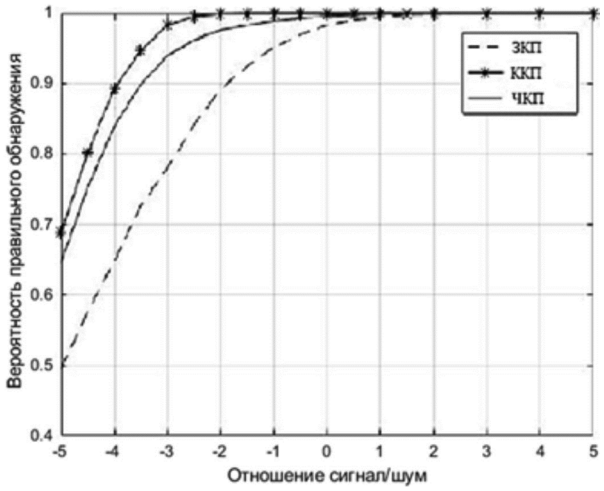


Таблица 1 – Зависимости правильного обнаружения от отношения сигнал-шум

SNR, дБ	-5	0	5
ЗКП	4993	369	0
ККП	3022	0	0
ЧКП	3472	94	0

Вероятности ложного срабатывания представлены на рисунке 9 и в таблице 2.

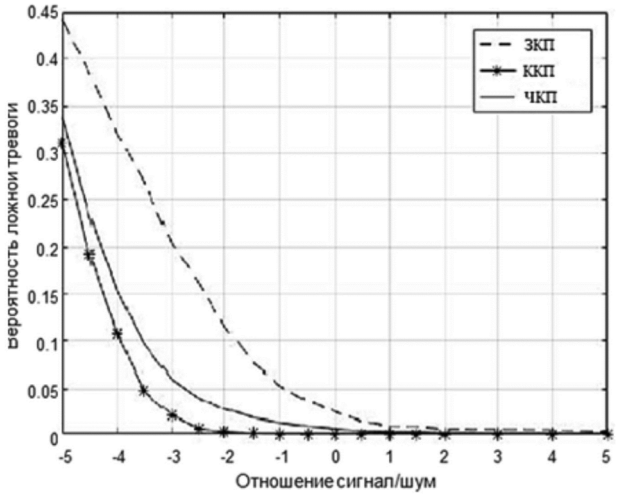


Рисунок 9 – Зависимости вероятности ложного срабатывания от отношения сигнал-шум для классического корреляционного приемника (ККП), знакового корреляционного приемника (ЗКП), частотного корреляционного приемника (ЧКП)

Таблица 2 – Зависимости ложного срабатывания от отношения сигнал-шум

SNR, дБ	-5	0	5	SNR, дБ
ЗКП	4406	237	3	ЗКП
ККП	3201	0	0	ККП
ЧКП	3398	18	0	ЧКП

Сравнение характеристик корреляционных приемников

Когда на вход корреляционного приемника попадает детерминированный сигнал, значение на выходе коррелятора превышает установленный порог. Если же шум ошибочно распознаётся как сигнал, происходит ложное

срабатывание. Основные показатели эффективности корреляционного приёмника включают вероятность правильного обнаружения сигнала (P_{cd}) и вероятность ложного срабатывания (P_{at}).

Чтобы определить характеристики изучаемых корреляторов, в системе MATLAB была разработана модель, параметры которой представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры сигналов, используемых при моделировании

Параметр	Значение
Диапазон SNR	от -5 дБ до 5 дБ
Количество PRACH сигналов (N)	10000
Количество отсчетов в опорном сигнале	54

В передатчике было сформировано N PRACH-сигналов. Затем передавали сигналы через канал с АБГШ. В приемнике принимались решения о присутствии или отсутствии сигнала, после чего эти решения сопоставлялись с данными, записанными с реальной базовой станции стандарта GSM 900. В итоге для каждого соотношения сигнал-шум были определены вероятности правильного обнаружения (P_{cd}) и ложного срабатывания (P_{at}).

Математическое моделирование показало, что классический корреляционный приемник обладает наилучшими характеристиками, тогда как значения для корреляторов со знаковым методом уступают примерно на 2 дБ, что заметно снижает их эффективность. Корреляционный приемник, работающий в частотной области, показал результаты, близкие к классическому варианту, отличаясь всего на 1 дБ, что делает его пригодным для применения в аналогичных условиях.

Заключение

В заключение следует отметить, что в ходе исследования были проанализированы три типа корреляционных приемников для обнаружения PRACH сигнала стандарта GSM на фоне помех. Описаны их структура, принципы работы. В контексте проекта разработки программно-аппаратного комплекса для поиска потерявшихся людей в лесном массиве, использующего БПЛА, особое значение приобретает расчет корреляции между принятым сигналом и PRACH сигналом. Это позволяет определять наличие мобильных устройств в сложных условиях, когда устройство могло не успеть подключиться к временной базовой станции на борту БПЛА.

На основе полученных результатов, наиболее подходящим корреляционным приемником для программно-аппаратного комплекса является классический корреляционный приемник. Выбрано он был по следующим причинам: знаковый приемник требует меньше ресурсов, но не обеспечивает необходимую вероятность правильного обнаружения, частотный приемник, хотя и точен, но сложнее в реализации и вносит задержку. Классический корреляционный приемник, учитывая небольшую длину преамбулы (PRACH сигнала) в 54 отсчета, затрачивает умеренное количество ресурсов, что делает его оптимальным выбором.

Литература

1. Разработка программно-аппаратного комплекса для поиска в лесном массиве потерявшегося человека с устройством мобильной связи [Online]. Available: https://engineers.tusur.ru/projects/2cb392b9-ab42-445f-a6fd-ac77acc0c721
2. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Multiplexing and multiple access on the radio path (GSM 05.02) [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/05/0502/05.00.00_60/gsmts_0502v050000p.pdf
3. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Physical layer on the radio path; General description (GSM 05.01 version 5.3.0) [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/05/0501/05.03.00_60/gsmts_0501v050300p.pdf.
4. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Modulation (GSM 05.04 version 7.0.0) [Online]: Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300900_300999/300959/07.00.00_40/en_300959v070000o.pdf
5. Как работает радиоинтерфейс в GSM-сетях [Online]. Available: https://habr.com/ru/articles/268127/ (дата обращения 11.12.2023).
6. Зюко, А.Г., et al. Теория передачи сигналов. М.: Радио и связь 355 (1986).
7. Коростелев, А.А., Клюев Н.Ф. and Мельник Ю.А.. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. радио (1978).

НОВЫЕ КНИГИ



Поборчая Н.Е.

Методы и алгоритмы оценивания параметров канала связи в условиях априорной неопределенности в системах с приемником прямого преобразования: Учебное издание для вузов. М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2023 г. 240 с.: ил.

Изложены методы и алгоритмы совместного оценивания параметров сигнала (канала связи) в условиях априорной неопределенности относительно статистических характеристик канала связи и законов распределения шумов. Особое внимание уделено системам с приемником прямого преобразования. Рассмотрены вопросы синтеза и анализа процедур оценивания для систем связи с одной передающей и приемной антенной (SISO), с несколькими передающими и приемными антеннами (MIMO), а также для систем с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM).

Предложенные алгоритмы способствуют повышению помехоустойчивости приема информации или понижению вычислительной сложности процедур обработки сигнала.

Для научных работников, инженеров и аспирантов. Может быть полезна студентам старших курсов и магистрантам, обучающимся по направлению подготовки «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».