

УДК 621.3.091.1

А.В. Убайчин

Помехоустойчивая радиосвязь на основе измерения параметров недетерминированных радиосигналов

Описан способ организации помехоустойчивой радиосвязи с высокой скрытностью. Помехоустойчивость и скрытность обеспечиваются за счет использования недетерминированных радиосигналов – белого шума для передачи информационных сообщений. Приведены структурные схемы передатчика и приемника, позволяющие реализовать технические средства абонентского оборудования для организации радиосвязи. Рассмотрены аспекты дальности действия, возможности обнаружения пассивными радиолокационными станциями и влияния преднамеренных радиопомех. Проведен анализ эффективности применения концепции многоприемниковости в нулевых модифицированных микроволновых радиометрах для повышения дальности действия радиосвязи.

Ключевые слова: недетерминированные радиосигналы, нулевой СВЧ-радиометр, многоприемниковый радиометр, новые виды радиосвязи, радиоэлектронная борьба, противодействие радиоэлектронным разведкам.

Современный уровень развития систем военной и специальной связи, коммуникационной части систем автоматизированного управления тактическими операциями диктует необходимость создания новых средств радиосвязи. Особенности эксплуатации средств военной и специальной радиосвязи обуславливают специфические характеристики каналов связи. Одной из важных характеристик специальных видов связи является скрытность. Процесс совершенствования специальной техники послужил стимулом к разработке многих способов обеспечения скрытой радиосвязи, основная концепция которых сводится к уменьшению спектральной плотности радиосигналов для усложнения их обнаружения «третьими лицами» [1]. Предельным случаем данного подхода является передача информационных сообщений посредством радиосигналов, мощность которых сопоставима с мощностью собственных (тепловых) шумов приемника.

Реализация предельного случая данного подхода позволяет скрыть радиосвязь от третьих лиц на энергетическом уровне. Практическая реализация данного подхода требует разработки новых технических средств приема, передачи и обработки радиосигналов, реализации новых типов кодирования и адаптации типов радиосигналов.

Данная статья описывает способ организации скрытной, помехоустойчивой радиосвязи на основе измерения энергии недетерминированных радиосигналов (белого шума) радиометрическими методами.

Классическая схема передачи радиосообщений состоит из передатчика, среды передачи радиосигналов и приемника [2]. В предлагаемом подходе по созданию системы радиосвязи на основе измерения энергии недетерминированных радиосигналов используется аналогичная концепция.

Разработка новой системы связи обуславливает перечень вопросов, которые необходимо рассмотреть при ее создании:

1. Создание методов и алгоритмов передачи информации при помощи недетерминированных радиосигналов.
2. Адаптация существующих методов кодирования для работы с недетерминированными сигналами.
3. Реализация аппаратной части «передатчик-приемник» в виде портативного устройства персональной связи, способного работать в жестких климатических условиях и обеспечивать скорость передачи данных не менее 32 кбит/с.
4. Разработка методов и алгоритмов, позволяющих понизить влияние помех в канале связи.

Затруднительно принимать детерминированные радиосигналы, если их мощность ниже уровня мощности собственных шумов приемника [1].

Обозначим собственные шумы на входе приемника как $s_{ш}(t)$ на временном интервале $(0 \dots t_1)$. Тепловой шум на входе радиоприемного устройства подчиняется нормальному закону распределения спектральной плотности [3]. Математическое ожидание $M_{ш}$ сигнала $s_{ш}(t)$ равно

$$M_{\text{ш}} = \frac{\int_0^{t_1} s_{\text{ш}}(t) dt}{t_1}. \quad (1)$$

Пусть $s_c(t)$ – недетерминированный радиосигнал с величиной математического ожидания M_c . Аналогично $s_{\text{ш}}(t)$ для $s(t)$ выполняется условие (1).

Если выполняется равенство

$$\int_0^{t_1} s(t) \cdot s_{\text{ш}}(t) dt = 0, \quad (2)$$

то сигналы $s_{\text{ш}}(t)$ и $s(t)$ некоррелированы.

Выполнение (2) обуславливает выражение

$$D_{\Sigma} = D + D_{\text{ш}} = M((s(t) - M_c)^2) + M((s_{\text{ш}}(t) - M_{\text{ш}})^2), \quad (3)$$

где D – дисперсия сигнала $s(t)$; $D_{\text{ш}}$ – дисперсия сигнала $s_{\text{ш}}(t)$; M – математическое ожидание, вычисляемое аналогично (1).

Выражение (3) показывает возможность изменения дисперсии (эквивалентно увеличению мощности шума) шумов на входе приемника. В рассматриваемом аспекте для наглядности примера удобно осуществлять амплитудную модуляцию сигнала $s(t)$. Таким образом, осуществляется способ формирования на входе приемника изменяющейся по закону $s(t)$ мощности шума.

Концепция построения радиосвязи на основе измерения энергии недетерминированных радиосигналов имеет много общего с классическими системами связи. Практическая реализация системы требует новых, не стандартных решений. Для оценки параметров шумовых сигналов с равномерной спектральной плотностью применяют микроволновые радиометры (СВЧ-радиометры). Следовательно, основой приемной части должен являться специализированный СВЧ-радиометр.

Амплитудно-модулированный шумовой сигнал пригоден для передачи аналоговых сообщений. С точки зрения повышения помехоустойчивости и эффективности использования радиометрического канала передачи данных наибольший интерес представляется в возможности передачи данных в цифровом виде. Для недетерминированных радиосигналов наиболее наглядный способ формирования цифровой передачи данных заключается в организации канала радиосвязи с частотным разделением. В этом случае каждый разряд информационного слова передается в определенной полосе частот.

На рис. 1 представлена структурная схема передатчика радиометрической системы связи. В основу алгоритма работы передатчика заложен принцип формирования опорного шумового сигнала при дифференциальных радиометрических измерениях [3].

Передатчик радиометрической системы связи функционирует следующим образом. Информационное сообщение формируется в источнике сигнала ИС

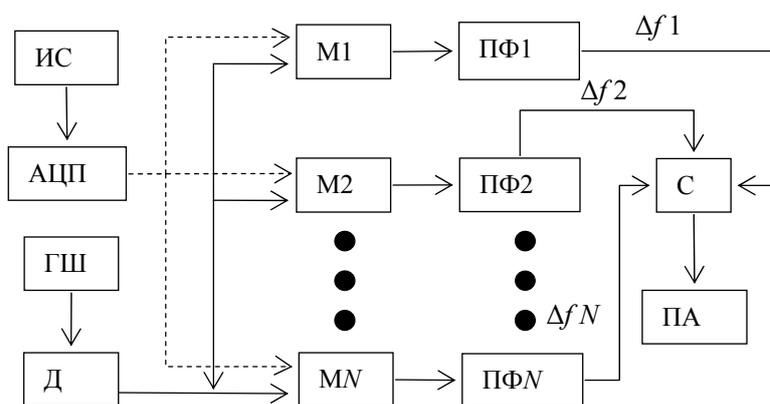


Рис. 1 Структурная схема передатчика

в аналоговом виде. Аналоговый сигнал ИС поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП, выходы которого управляют состоянием СВЧ-импульсных модуляторов $M_1, M_2 \dots M_N$. Модуляторы представляют собой СВЧ-переключатели поглощающего типа «один вход – один выход» с двумя функциональными состояниями – «открыт-закрыт». Входы модуляторов соединены с выходами делителя мощности Д, ко входу которого подключен широкополосный генератор шума ГШ. Выходы модуляторов соединены с входами полосовых фильтров ПФ 1, ПФ 2, ..., ПФ N, имеющих полосы пропускания $\Delta f_1, \Delta f_2 \dots \Delta f_N$. Выходы полосовых фильтров соединены с входами СВЧ-сумматора (С). Выход сумматора соединен с широкополосной передающей антенной ПА. Таким образом, сигнал генератора шума поступает на полосовые фильтры под управлением модуляторов,

контроль над которыми осуществляется логическими сигналами АЦП. Разрядность цифрового кода передаваемого слова N в данной структурной схеме определяется количеством совокупных пар полосовых фильтров и модуляторов.

Для формирования передаваемого информационного слова осуществляется амплитудно-импульсная модуляция сигнала генератора шума. Логическая единица на выходе АЦП соответствует открытому состоянию модулятора, что увеличивает мощность шумового сигнала в соответствующей полосе частот. При закрытом состоянии модулятора сигнал ГШ не поступает на ПФ, поглощаясь на согласованной нагрузке модулятора.

На рис. 2 приведен пример распределения спектральной плотности в рабочей полосе частот, формируемой шеститбитным передатчиком, при передаче символа «+», цифровое обозначение по таблице символов ASCII-43, что соответствует последовательности 101011 в двоичной системе счисления.

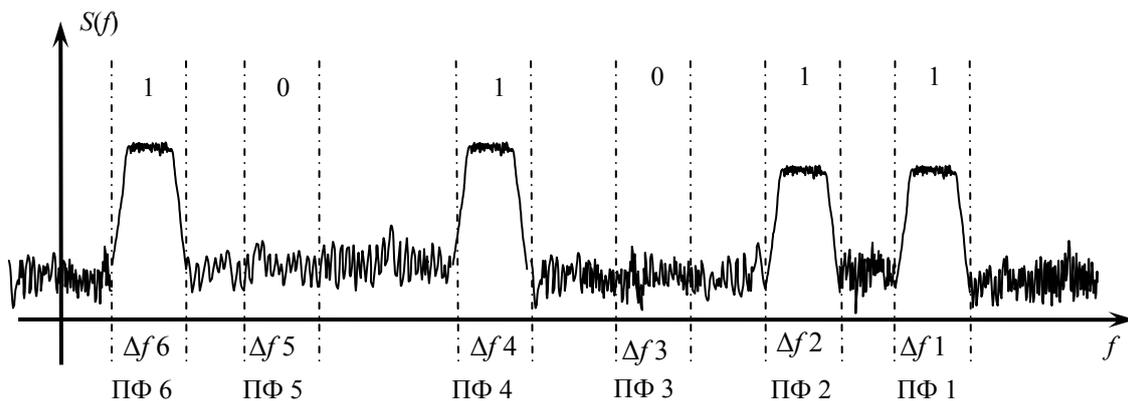


Рис. 2. Спектральная плотность в рабочей полосе частот при передаче символа «+»

Для анализа информационного сообщения приемник осуществляет операции частотной селекции, усиления, детектирования цифровых сигналов, полосы рабочих частот аналогичны рабочим полосам передатчика. Структурная схема приемника представлена на рис. 3.

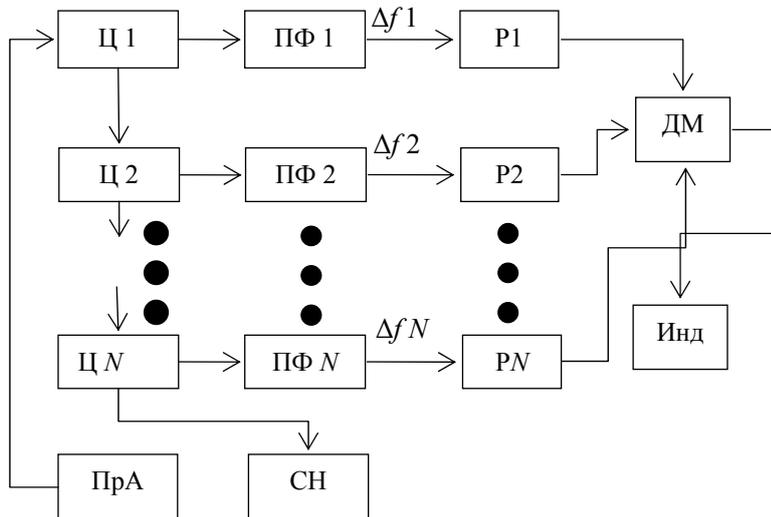


Рис. 3. Структурная схема приемника

Приемник состоит из широкополосной приемной антенны ПрА, циркуляторов Ц 1, Ц 2 ... Ц N, полосовых фильтров ПФ 1, ПФ 2, ..., ПФ N, радиометров Р 1, Р 2, ..., Р N, демодулятора ДМ, индикатора Инд. Функционирование приемника осуществляется следующим образом. На вход приемной антенны поступает сигнал, излученный передающей антенной (вид сигнала см. на рис. 2). Выход антенны соединен с входом циркулятора Ц 1. Циркулятор Ц 1 передает сигнал на выход, соединенный с полосовым фильтром ПФ 1. В соответствии с частотной характеристикой фильтра ПФ 1 на вход циркулятора Ц 2 поступает сигнал, переотраженный

от входа ПФ 1. Шумовой сигнал с полосой Δf^1 поступает на вход радиометра Р 1. Аналогично функционируют другие приемные каналы. Выходные сигналы радиометров поступают на демодулятор, производящий восстановление принятого цифрового кода в цифровую форму, пригодную для интерпретации.

Основное звено приемника – радиометры. При помощи классических схемных решений [4] по реализации микроволновых радиометров невозможно регистрировать «быстрые» изменения шумо-

вой температуры антенны с точностью более 15...20% ввиду флуктуаций коэффициента передачи приемника [5], что накладывает ограничения на максимальную пропускную способность канала связи. Долговременная стабильность классических решений невысока без применения дополнительных технических средств – криогенное охлаждение, системы контроля усиления, термостатирования [6].

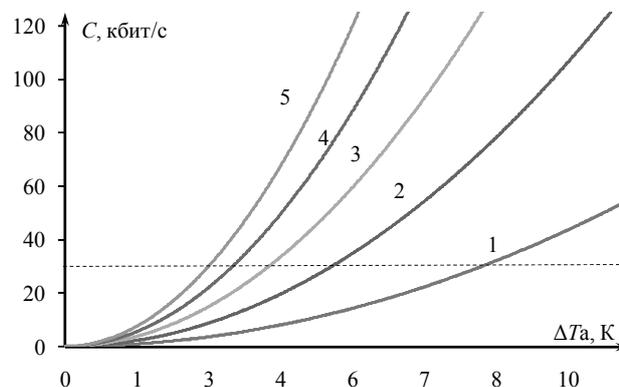
Разрабатываются новые типы радиометров [5, 7]. В [7] описан радиометр, основанный на модифицированном методе нулевых измерений и концепции многоприемниковости для построения радиометрических систем, состоящих из четырех приемников. Совокупность схемных решений, исходя из указанной концепции, позволяет создавать радиометрические системы с чувствительностью, превосходящей чувствительность идеального компенсационного радиометра, а также улучшить динамические свойства системы. Как показали проведенные изыскания, данные радиометрические системы обладают высокой стабильностью в условиях изменяющихся факторов внешней среды – термостатирование приемника не требуется.

В основе работы радиометров заложен процесс усреднения измеряемых сигналов. Зачастую при проектировании необходимо решать противоречивую задачу увеличения чувствительности при заданных динамических характеристиках системы. На примере приемника нулевого радиометра с полосой пропускания $\Delta f = 100$ МГц, уровнем собственных шумов $T_{ш} = 150$ К, динамическим диапазоном 50 ... 350 К при заданной флуктуационной чувствительности $\Delta T_a = 1$ К время одного измерения составляет $t_{изм} = 1,1$ мс [5]. Для передачи одного информационного бита требуется время, превышающее время одного измерения не менее чем в два раза – $t_{бит} = 2,2$ мс, что соответствует максимальной скорости передачи $C_{макс} \approx 0,452$ кбит/с. В данном случае типовые технические характеристики радиометра не удовлетворяют минимальным требованиям пропускной способности радиоканала. Для увеличения скорости передачи требуется повысить чувствительность, что эквивалентно уменьшению времени измерения (повышению динамики измерений).

Эффективным решением увеличения флуктуационной чувствительности для модифицированных нулевых радиометров является применение концепции многоприемниковости [8]. Применение четырех приемников в составе одного радиометра позволяет повысить флуктуационную чувствительность в два раза [7]. На рис. 4 представлены графики функций, характеризующих эффективность применения нулевых радиометров с различным числом приемников в зависимости от требуемой динамики измерений. Пунктиром обозначен уровень скорости передачи данных 32 кбит/с.

Анализ рис. 4 показывает, что применение в составе одного канала радиометра с четырьмя приемниками позволяет увеличить динамику измерений в два раза. Данная зависимость хорошо согласуется с исследованиями, проведенными ранее [9].

Рис. 4. Зависимость скорости канала от флуктуационной чувствительности радиометров



Актуальным вопросом является возможность обнаружения радиометрической связи. Эффективный способ обнаружения источников радиоизлучения – применение пассивных радиолокационных станций (РЛС) [10]. Чувствительность современных пассивных РЛС (на примере РЛС «Кольчуга») составляет $-90...-120$ дБ/Вт [11], что соответствует мощности $10^{-9}...10^{-12}$ Вт в минимальной полосе приема – 50 кГц. Рассматриваемый случай максимальной чувствительности (-120 дБ) РЛС способен обнаружить работу радиоканала, если мощность передатчика превышает $1,45 \cdot 10^5$ К (эквивалент мощности 10^{-12} Вт). Предположим, что центральная частота организуемой радиометрической радиосвязи составляет 3 ГГц. Ослабление свободного пространства на радиотрассе длиной 100 км для данной рабочей частоты составляет $\gamma \approx -140$ дБ [2].

Максимальная мощность (шумовая температура) передатчика в совокупности с флуктуационной чувствительностью радиометра в составе приемника при учете вносимого ослабления средой

распространения определяет дальность радиосвязи без учета направленного действия антенных систем и других факторов.

Исходя из исследований, проведенных в [4], функционально зависимость дальности от числа приемных каналов описывается законом

$$r \sim \frac{1}{\sqrt{H}}, \quad (4)$$

где r – дальность радиосвязи; H – число приемных каналов радиометра. На рис. 5 представлены расчетные зависимости потенциальной дальности радиосвязи в зависимости от флуктуационной чувствительности приемника при обеспечении пропускной способности канала связи не менее 32 кбит/с. Треугольными маркерами отмечена расчетная зависимость, пунктирной линией – зависимость вида (4).

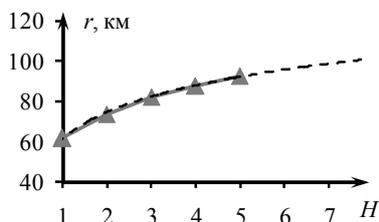


Рис. 5. Зависимость расчетной дальности действия радиосвязи как функции числа приемников в составе радиометра

Отличительной особенностью разрабатываемой радиосвязи является помехоустойчивость. Как отмечено в литературе [12], шумовые помехи могут эффективно использоваться для подавления радиоэлектронных средств любого назначения. В зависимости от способа генерации различают прямошумовые и модулированные шумовые помехи. Рассмотрим влияние таковых на организованный канал радиосвязи.

На рис. 6 приведен пример сравнения частотного диапазона радиосвязи до воздействия помехи (спектр отмечен пунктирной линией) и после воздействия прямошумовой помехи. Прямошумовые помехи генерируются при помощи специальных генераторов шума СВЧ. Прямошумовые помехи и сигнал передатчика имеют одинаковую природу (в том числе выполнены по аналогичному схемотехническому исполнению), следовательно, выполняется условие (2). Исходя из этого, спектральные плотности помехи и сигнала радиосвязи складываются, что проиллюстрировано на рис. 6, а.

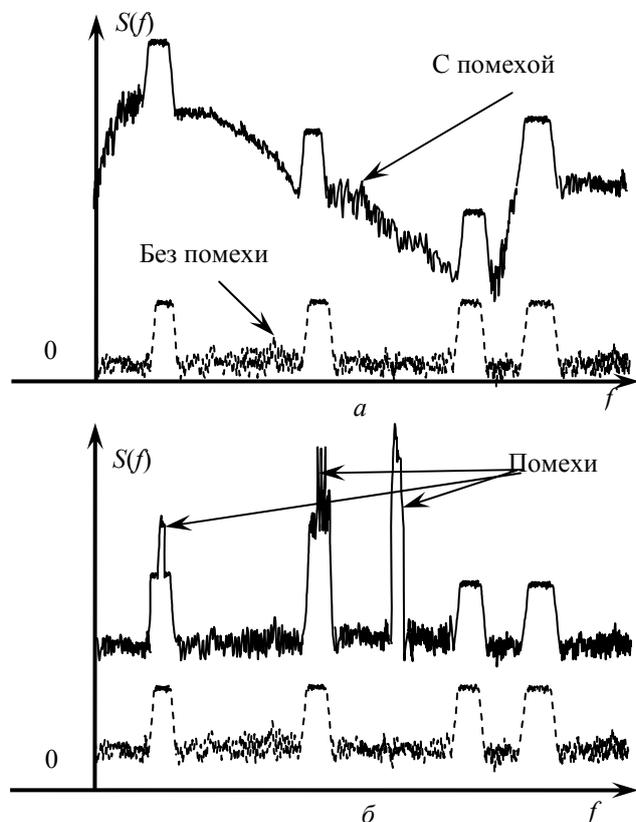


Рис. 6. Влияние преднамеренных помех на радиосвязь

Изменение спектральной плотности при воздействии аддитивной мощности сигнала прямошумовой помехи представлено рис. 6, а.

Эффективным способом борьбы с преднамеренными прямошумовыми помехами является адаптивное изменение динамического диапазона. В отличие от классических схемных решений радиометров [13, 14] в нулевых модифицированных радиометрах изменение динамического диапазона осуществляется без конструктивных изменений схемотехнической части приемника. Процесс перестройки динамического диапазона осуществляется оперативно, при помощи встроенных цифровых средств управления радиометром [15]. Ограничение работы описанного способа борьбы с прямошумовыми помехами заключается в конечном динамическом диапазоне линейности радиоприемного тракта и диапазоне изменения мощности опорных источников шумового сигнала радиометра [5].

В части воздействия модулированных шумовых помех радиометрический радиоканал уязвим в большей степени. Воздействие амплитудно-модулированных шумовых радиопомех проиллюстрировано на рис. 6, б.

Попадание такой помехи в рабочую полосу приемника с энергией, большей, чем энергия, приходящая на один дискрет цифрового кода длительности широтно-импульсного сигнала (эквивалент энергии приращения флюктуационной чувствительности [5]), приводит к искажению передаваемого бита. Решение данной проблемы может заключаться в применении алгоритма адаптивного синхронного изменения рабочих частот приемника и передатчика. Практическая реализация подобных алгоритмов применительно к нулевым модифицированным радиометрам в данной работе не рассматривается.

Аналогичные задачи по устранению влияния помех на радиометрические измерения решаются в работах [16–18]. Устранение влияния помех достигается при помощи прямой оцифровки результатов измерений с последующей обработкой на цифровых сигнальных процессорах [19]. Данные алгоритмы эффективно применяются для компенсационных радиометров. В открытых источниках аналогичных методов обработки сигналов для нулевых радиометров нами не выявлено.

Заключение. Предложен способ организации скрытного, помехозащищенного канала радиосвязи на основе недетерминированных радиосигналов. Рассмотрен метод передачи цифровой информации на основе частотного разделения. Показана эффективность применения многоприемниковых нулевых радиометров для реализации приемной части абонентского радиооборудования.

В рамках статьи недостаточно полно освещены вопросы эффективности радиосвязи при воздействии преднамеренных радиопомех и практической реализации технической части абонентских устройств. Ответы на эти и другие вопросы будут получены в последующих исследованиях, которые включают в себя работы по разработке имитационных макетов приемника и передатчика, принципиальных схем, созданию макетов и исследованию их характеристик, проведению экспериментов по передаче речевых сообщений, разработке алгоритмов адаптации к помеховой обстановке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по контракту № 02.G25.31.0107 от 14 августа 2014.

Литература

1. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи: вероятностно-временной подход / В.И. Борисов, В.М. Зинчук. – М.: РадиоСофт. – 2009. – 260 с.
2. Акулиничев Ю.П. Теория электрической связи / Ю. П. Акулиничев. – М.: Лань, 2010. – 240 с.
3. Краус Д.Д. Радиоастрономия / Д.Д. Краус. – М.: Сов радио, 1973. – 456 с.
4. Filatov A.V. The dynamic properties of a digital radiometer system and its operating efficiency / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin // *Measurement Techniques*. – 2012. – Т. 54, № 10. – Р. 1–6.
5. Филатов А.В. Радиометрические системы нулевого метода измерений. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 276 с.
6. Филатов А.В. Двухканальный микроволновый радиометр повышенной точности / А.В. Филатов, А.В. Убайчин, Н.О. Жуков // *Радиотехника*. – 2011. – № 1. – С. 47–55.
7. Filatov A.V. A microwave four-channel null L-band radiometer / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin, D.E. Paraev // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2012. – Vol. 55, № 1. – Р. 59–64.
8. Filatov A.V. A two-receiver microwave radiometer with high transfer characteristic linearity / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin, A.A. Bombizov // *Measurement Techniques*. – 2013. – Vol. 55, № 11. – Р. 1281–1286.
9. Филатов А.В. Микроволновый нулевой радиометр с комбинированной импульсной модуляцией / А.В. Филатов, Н.А. Каратаева, В.Д. Дмитриев // *Измерительная техника*. – 2007. – № 03. – С. 65–68.
10. Радзиевский В.Г. Особенности совместного применения маскирующих и имитирующих помех в условиях конфликтной радиолокации / В.Г. Радзиевский, Н.А. Шляхин // *Радиотехника*. – 1992. – № 1–2. – С. 18–24.
11. Коробка О.Г. Пасивна радіолокація. Загальні перспективи розвитку та конкретні зразки техніки // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2004. – № 2 (6). – С. 11–15.
12. Палий А.И. Радиозлектронная борьба: (Средства и способы подавления и защиты радиозлектронных систем). – М.: Воениздат, 1981. – 320 с.
13. Алексеев П.В. Микроволновый сканирующий радиометр интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА) // *Исследование Земли из космоса*. – 2003. – № 5. – С. 68–77.
14. Микроволновый радиометр-спектрометр с предельными характеристиками для изучения Земли из космоса в диапазоне 6...220 ГГц / Ю.Б. Хапин, А.В. Кузьмин, А.Г. Семин, Е.А. Шарков //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 4. – С. 64–75.

15. Убайчин А.В. Линейность передаточной характеристики нулевых радиометров с комбинированной импульсной модуляцией при высоком динамическом диапазоне измеряемых шумовых температур // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9–3. – С. 130–133.

16. Первушин Р.В. Спектральный анализ при поляризационных измерениях в радиотеплолокации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2011. – № 1. – С. 53–55.

17. Метод компенсации искажений, возникающих в корреляционном радиометре при воздействии / В.А. Калинин, Д.Н. Ивлев, В.С. Беагон, А.В. Калинин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – № 7(1). – С. 71–78.

18. Калинин В.А. Корреляционный радиометр для антенных и интерферометрических измерений / В.А. Калинин, В.С. Беагон, А.В. Калинин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 5(3). – С. 88–94.

19. Тимошенко А.Г. О влиянии разрядности и быстродействия ЦАП на параметры каналов связи / А.Г. Тимошенко, Л.В. Перцев, М.А. Можняков // Естественные и технические науки. – 2011. – № 6. – С. 447–449.

Убайчин Антон Викторович

Науч. сотрудник СКБ «Смена» ТУСУРа

Тел.: +7-952-883-67-67.

Эл. почта: dualog@mail.ru

Ubaichin A.V.

On the issue of a noise-immune radio communication by using a radiometric methods

The paper describes a new approach to noise-immune radio communication. The noise-immune properties are provided by a non-deterministic signal - white noise for information message transfer. The structure of a receiver and a transmitter is determined. The range, the detection possibility and the influence of radio interference are discussed.

Keywords: non-deterministic signals, zero radiometer multi-receiver radiometer, new types of radio communications, radio electronic warfare, anti-electronic intelligence, radio electronic intelligence opposition.