

УДК 621.391.822

ЗАЩИТА МОДУЛЯЦИОННОГО РАДИОМЕТРА ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ЧАСТОТОЙ ОПОРНОГО КОЛЕБАНИЯ

И. Я. Орлов^{1*}, *С. Д. Снегирев*^{2,3}

¹ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского;

² Научно-исследовательский радиофизический институт;

³ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены методы адаптации модуляционного радиометра в условиях априорной неопределённости временного распределения импульсных помех. Предложено два способа формирования опорного напряжения: в соответствии с измеряемыми временными параметрами импульсных помех и в соответствии с текущими параметрами импульсных помех.

ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия наблюдается резкий рост количества помех, осложняющих работу радиометрических систем. Об этом говорит опыт эксплуатации орбитальных радиотелескопов «WindSat», SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer), AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer — EOS [1]), радиометра CAROLS (Cooperative Airborne Radiometer for Ocean and Land Studies), размещённого на борту летательного аппарата [2], а также наземных радиотелескопов, таких как ПАТАН-600 [3, 4] и радиотелескопа в обсерватории Аресибо [5].

Рост количества помех обусловлен развитием и появлением новых систем связи, а также навигационных и радиолокационных систем. Так, освоение новых частотных диапазонов в системе мобильной связи GSM в сентябре 2005 года привело к временной невозможности использования крупнейшего отечественного радиотелескопа ПАТАН-600 в некоторых частотных диапазонах [3, 4]. Негативное влияние спутниковых систем связи «Iridium» и навигации ГЛОНАСС на работу радиометров обсуждается в [6, 7]. Большое число публикаций [1, 2, 8, 9] посвящено борьбе с импульсными помехами радиолокационных систем. При этом зачастую помеха сосредоточена вне полосы работы радиометра, однако она всё равно просачивается через входные фильтры устройства и переводит следующие за фильтром каскады в режим насыщения [4] или вызывает сложные нелинейные искажения принимаемого сигнала [7].

Защита радиометров от негативного воздействия помех осуществляется в основном с помощью методов, разработанных для систем связи. Так, в случае, когда частоты помехи заранее известны (например, когда источником помехи является система связи), используется полосовая фильтрация [3, 4]. Широко используются модификации компенсации и бланкирования (вырезания импульсов) [10].

* orlov@rf.unn.ru

1. АДАПТАЦИЯ МОДУЛЯЦИОННОГО РАДИОМЕТРА В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

Известно, что модуляционный метод измерения мощности шумового сигнала заключается в периодическом (с частотой опорного колебания) приёме поочередно шумового сигнала и эталонного излучения [11]. Следовательно, воздействие на модуляционный радиометр импульсных помех можно рассматривать как взаимодействие двух потоков: потока импульсных помех и потока прямоугольных импульсов опорного напряжения, открывающих радиометр для приёма шумового сигнала. Вероятность W прохождения импульсных помех в приёмный тракт определяется вероятностью совпадения импульсных помех $U_n(t)$ с импульсами опорного колебания, пропускающими шумовое излучение полезного сигнала $U_c(t)$ на вход радиометра.

На вход радиометра поступает аддитивная смесь $U_{\text{вх}}(t) = U_c(t, \alpha) + U_n(t, \beta) + U_{\text{ш}}(t)$, где $U_{\text{ш}}(t)$ — белый гауссовый шум, α и β — медленно меняющиеся параметры полезного сигнала и помехи соответственно. Обычно параметры помехи β и их статистические характеристики неизвестны и могут изменяться в процессе измерения сигнального параметра α . Для поддержания условий оптимальной оценки непрерывных параметров α сигнала $U_c(t, \alpha)$ при наличии таких помех обработка смеси $U_{\text{вх}}(t)$ должна быть адаптивной [12].

Возможны, по крайней мере, два пути для решения этой задачи. Первый состоит в адаптивном управлении приёмным устройством [12]. Второй — в подборе способа формирования сигнала $U_c(t)$ [13]. Для модуляционного принципа измерений имеем

$$W(U_n, U_0) = W(U_0)W_{U_0}(U_n) = W(U_n)W_{U_n}(U_0), \quad (1)$$

где $W(U_n, U_0)$ — вероятность совместного появления импульсных помех U_n и опорных импульсов U_0 в течение выбранного времени анализа τ , $W(U_n)$ — априорное распределение вероятностей появления импульсов помех, $W(U_0)$ — априорное распределение вероятности появления опорных импульсов, $W_{U_n}(U_0)$ — условная вероятность появления опорного импульса при наличии импульсов помехи, $W_{U_0}(U_n)$ — условная вероятность появления импульсов помехи при наличии опорных импульсов.

Отсюда вероятность появления импульсов помехи во время открытого приёмного тракта (антенна подключена через модулятор к приёмно-усилительному блоку) определяется апостериорным распределением

$$W_{U_0}(U_n) = \frac{W(U_n)}{W(U_0)} W_{U_n}(U_0).$$

В частном случае неизменяемых параметров опорного напряжения опорные импульсы и поток импульсных помех статистически независимы. Вероятность прохождения импульсных помех в приёмный тракт в этом случае определяется потоком совпадений и равна произведению априорных вероятностей

$$W(U_n, U_0) = W(U_n)W(U_0).$$

Если априорное распределение помехи $W(U_n)$ неизвестно, то оптимизация оценки параметров сигнала при наличии помехи сводится к минимизации корреляционного интеграла

$$K(\alpha, \beta) = \frac{2}{N_0} \int_0^{\tau} U_c(t, \alpha) U_n(t, \beta) dt,$$

где τ — время наблюдения, N_0 — спектральная плотность мощности собственных шумов $U_{\text{ш}}(t)$ радиометра.

Одной из возможностей минимизации влияния помехи является использование сигналов, ортогональных с помехой. Поскольку априорное распределение вероятностей появления импульсных помех может изменяться со временем, управление параметрами сигнала должно учитывать текущее значение вероятности $W(\alpha, \beta)$.

В целях сохранения модуляционного принципа измерений управление временными параметрами принимаемого сигнала (частотой следования опорного колебания) должно проводиться таким образом, чтобы во время действия помехи проводилось измерение эталонного излучения.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ИЗМЕРЯЕМЫМИ ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

В отсутствие импульсных помех применяется классический модуляционный способ приёма, при котором с помощью генератора опорного напряжения с постоянной частотой F_0 и скважностью $Q = 2$ попеременно измеряется мощность шумового сигнала P_C и мощность эталонного шума P_Σ с последующим синхронным (с частотой F_0) накоплением разности этих мощностей.

При воздействии импульсных помех выделяются импульсы помехи $U_1(t)$ (см. рис. 1а) и по срезам (задним фронтам) импульсов помех формируются управляющие импульсы $U_2(t)$. Для управления измерением используется информация о временном интервале между срезами двух последовательных импульсов помехи. С этой целью в течение всего времени анализа измеряется интервал Δt_i между моментами времени t_i и t_{i+1} , совпадающими со срезами i -го и $(i+1)$ -го импульсов помехи. Этот интервал делится пополам. По срезу i -го импульса помехи с некоторой задержкой $\tau_3 \ll \Delta t_i$ формируется фронт положительного импульса опорного напряжения $U_0(t) = U_3(t)$ с длительностью $\Delta t_i/2$, во время которого отсутствует помеха и измеряется полезный сигнал с мощностью P_C . В течение времени $\Delta t_i/2$, когда действует помеха, измеряется эталонный шум с мощностью P_Σ .

Данный способ эффективен для измерения мощности шума при наличии периодических импульсных помех, когда $\Delta t_i = \Delta t_{i+1}$. В этом случае помехи подавляются полностью. При наличии квазипериодических импульсных помех, когда временные интервалы Δt_i и Δt_{i+1} между следующими друг за другом импульсными помехами отличаются незначительно (т. е. $|\Delta t_{i+1} - \Delta t_i| < \tau_3$), происходит полное исключение действия помех, но имеет место погрешность, связанная с различием между временем Δt_{iA} измерения мощности сигнала P_C и временем измерения $\Delta t_{i\Sigma}$ мощности эталонного излучения P_Σ , т. к. $\Delta t_{iA} = \Delta t_i/2$, а $\Delta t_{i\Sigma} = \Delta t_{i+1} - \Delta t_i/2$. Относительная погрешность измерения вследствие временной асимметрии опорного колебания при времени накопления сигнала τ равна

$$\delta_0 = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^N (\Delta t_{i\Sigma} - \Delta t_{iA}). \quad (2)$$

Погрешность δ_0 пренебрежимо мала, т. к. $(\Delta t_{i+1} - \Delta t_i)/\Delta t_i \ll 1$.

Пусть помеха представляет собой последовательность хаотических импульсных помех (см. рис. 1а) со случайной длительностью. При этом

$$\tau_{i+2} \leq \Delta t_{i+1} - \Delta t_i/2. \quad (3)$$

где Δt_{i+1} — временной интервал между срезами $(i+1)$ -го и $(i+2)$ -го импульсов, Δt_i — предыдущий временной интервал (между i -м и $(i+1)$ -м импульсами), τ_{i+2} — длительность $(i+2)$ -го импульса. В этом случае также полностью исключается действие помех во время измерения полезного сигнала, однако имеет место погрешность (2) из-за временной асимметрии.

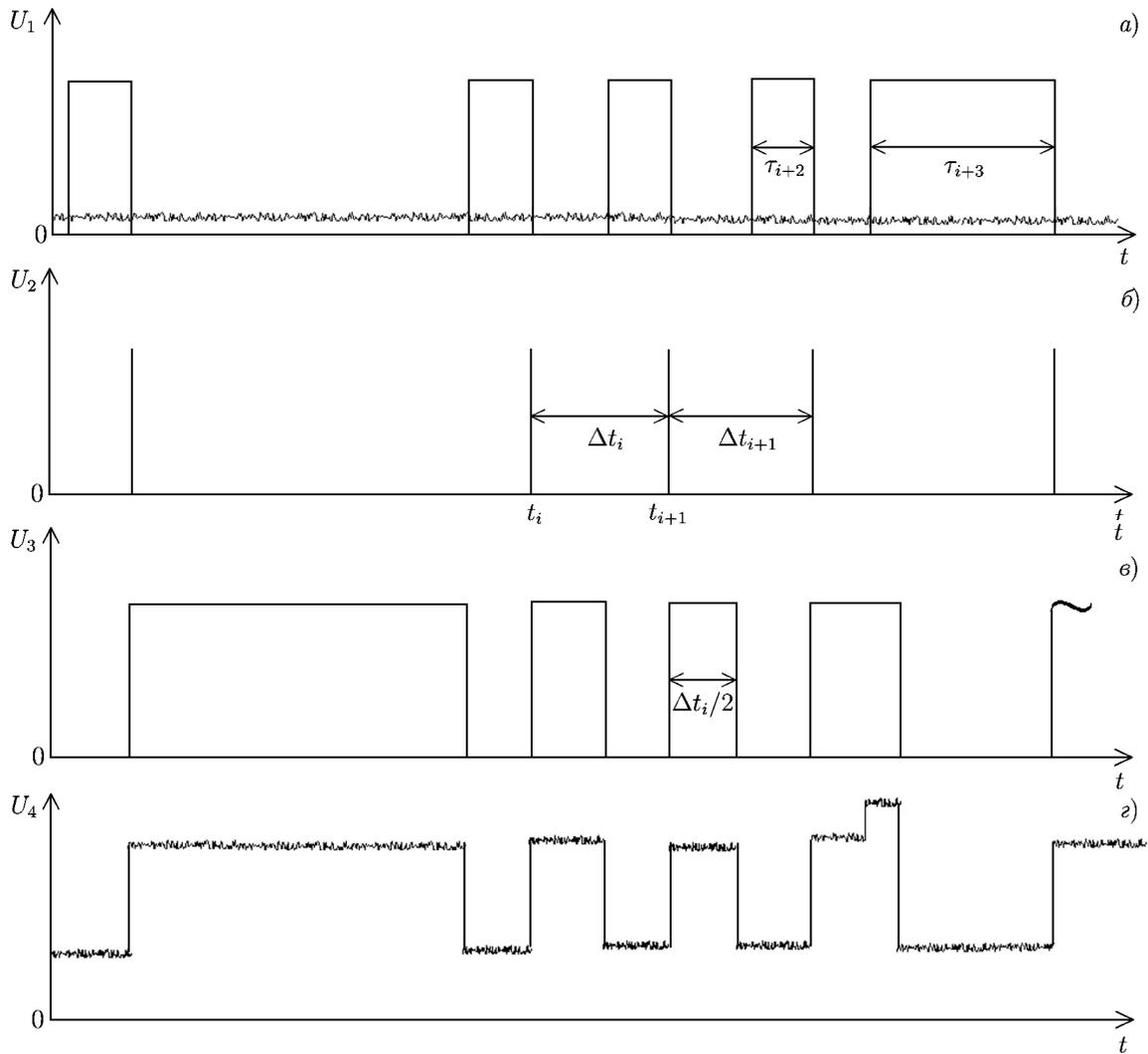


Рис. 1. Управление опорным колебанием модуляционного радиометра в соответствии с временными параметрами импульсных помех

Пусть помеха представляет собой последовательность случайных по длительности и моментам появления импульсов, в которой с некоторой вероятностью W_1 встречаются импульсные помехи со случайной длительностью

$$\tau_{i+3} > \Delta t_{i+1} - \Delta t_i/2. \tag{4}$$

В этом случае с вероятностью W совпадения потока импульсных помех с опорными импульсами генератора опорного напряжения измеряется не только мощность сигнала P_C , но и мощность помех P_n (см. рис. 1г) Используя теорию случайных импульсных помех [14], можно показать, что для стационарного потока импульсов в произвольно взятый момент времени вероятность совпадения с импульсами генератора опорного напряжения составляет величину

$$W = \bar{F}_n \bar{\tau}_n \bar{F}_0 \bar{\tau}_0.$$

Здесь \bar{F}_n и $\bar{\tau}_n$ — средняя частота следования и математическое ожидание длительности импульсов помех соответственно, \bar{F}_0 и $\bar{\tau}_0$ — частота следования и длительность импульсов генератора опорного напряжения. Средняя частота наложений импульсов $F_{совп} = \bar{F}_0 \bar{F}_n (\bar{\tau}_0 + \bar{\tau}_n)$.

Измеряемая за время накопления τ мощность помех равна

$$P_n = \sum_{j=1}^M P_j,$$

где P_j — мощность части j -го импульса помехи, попадающей в интервал Δt_A , M — число импульсов помехи, совпадающее с опорными импульсами, τ — время накопления. Относительная погрешность измерения в результате действия импульсных помех определяется приращением выходного сигнала за счёт действия помехи и равна

$$\delta_n = \frac{P_n}{P_n + P_C}.$$

Наряду с этой погрешностью имеет место погрешность δ'_0

$$\delta'_0 \geq \frac{1}{\tau} \sum_{i=1, i \neq j}^{N-M} (\Delta t_i - \Delta t_{i+1}) \quad (5)$$

из-за временной асимметрии, где $N - M$ — число импульсов помехи, не совпадающих с опорными импульсами. Результирующая погрешность измерений, обусловленная действием помех, в этом случае равна

$$\delta_0 = \delta_n + \delta'_0.$$

Таким образом, при рассмотренном способе управления отклонение от периодичности импульсного потока приводит к погрешности, обусловленной асимметрией времени измерения мощностей P_C и P_Σ . Более того, хаотические импульсные помехи с параметрами (4) проходят в измерительный тракт и, как следствие, увеличивают погрешность измерения. Поэтому данный способ защиты наиболее эффективен для случая периодических и квазипериодических помех.

Устройство, использующее данный способ измерения мощности шумового процесса, может быть реализовано по блок-схеме, показанной на рис. 2. На вход радиометра поступает смесь шумового сигнала $U_c(t)$ и помехи в виде последовательности квазипериодических радиоимпульсов со скважностью $Q > 2$ и мгновенной частотой следования F_n (см. рис. 1а). Через направленный ответвитель 2 входная смесь поступает на вход модулятора 3 и блок выделения помехи 8. На вход управляемого генератора опорного напряжения 7 поступает последовательность кратковременных видеоимпульсов, сформированных по срезам импульсов помехи (рис. 1б). При этом передний фронт опорного импульса генератора опорного напряжения, открывающий модулятор для передачи сигнала из антенны на вход приёмно-усилительного блока 5, формируется по срезу импульса помехи (см. рис. 1в). Опорное напряжение обеспечивает тем самым подключение на время действия помехи на вход приёмно-усилительного блока 5 эталонной нагрузки 4. В результате, как было показано выше, влияние периодических и квазипериодических импульсных помех устраняется полностью.

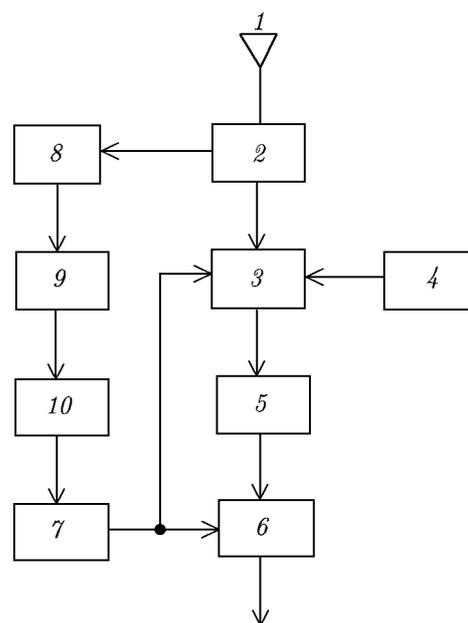


Рис. 2. Структурная схема радиометра с управлением опорным колебанием в соответствии с временными параметрами импульсных помех: 1 — антенна, 2 — направленный ответвитель, 3 — модулятор, 4 — эталонная нагрузка, 5 — приёмно-усилительный блок, 6 — синхронный детектор, 7 — генератор опорного напряжения, 8, 9 — блоки выделения помех, 10 — формирователь импульсов управления

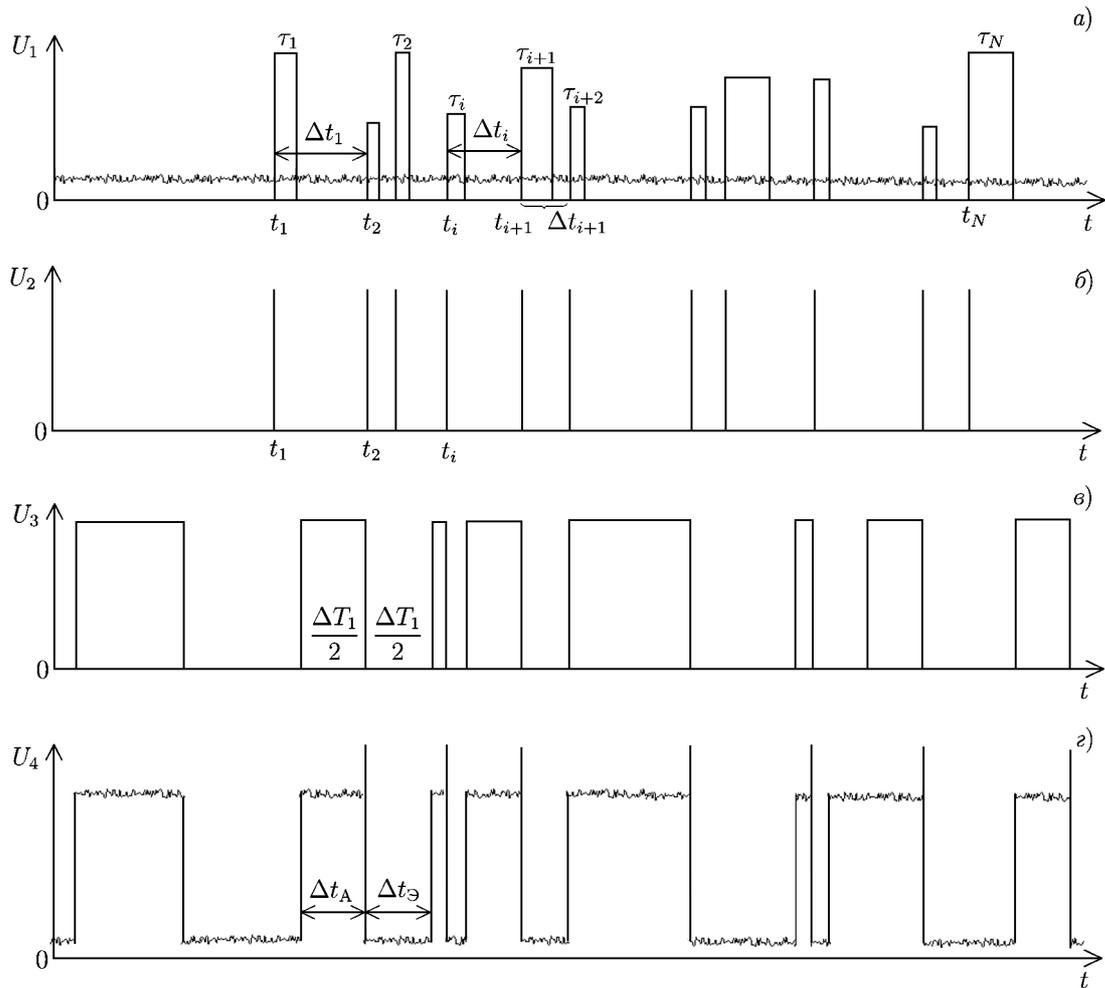


Рис. 3. Управление опорным колебанием модуляционного радиометра в соответствии с текущими параметрами импульсных помех

3. ФОРМИРОВАНИЕ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ТЕКУЩИМИ ПАРАМЕТРАМИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

Как было показано выше, при воздействии хаотических импульсных помех формирование опорного напряжения в соответствии с параметрами, полученными в результате предыдущих измерений, может привести к существенным погрешностям. Это связано с тем, что в таком способе формирования опорного напряжения используется информация о предыдущем временном интервале между импульсами помехи. Поскольку моменты появления t_i и длительности τ_i импульсов хаотических помех случайны, то и предыдущий интервал Δt_i случайным образом отличается от последующего интервала времени Δt_{i+1} между импульсами помех.

Управление измерениями в модуляционном радиометре в соответствии с текущими временными параметрами импульсного потока можно организовать следующим образом. При воздействии хаотических импульсных помех (см. рис. 3а) осуществляется обнаружение их передних фронтов, по которым формируются управляющие импульсы (см. рис. 3б). С момента поступления фронта импульса помехи в течение времени $\Delta \tau_i/2$, равного предыдущему интервалу времени измерения мощности шумового сигнала, измеряется мощность излучения от эталонной нагрузки (см. рис. 3в).

В результате такого способа управления опорным колебанием мощность эталонного излучения измеряется во время действия помехи. При этом сохраняется равенство временных интервалов Δt_{iA} и $\Delta t_{iЭ}$ измерения эталонного излучения и шумового сигнала.

Устройство, реализующее предлагаемый способ измерения мощности шумового процесса, может быть выполнено по блок-схеме, показанной на рис. 4. На вход антенны 1 поступает смесь шумового сигнала и последовательности хаотических импульсных помех с мгновенной скважностью $Q_i > 2$. Эта смесь поступает через направленный ответвитель 2 на входы модулятора 3 и блока выделения помехи 8. До момента t_1 появления первого импульса помехи напряжение на входе управляемого генератора опорного напряжения 7 равно нулю. В этом режиме генератор опорного напряжения вырабатывает периодическое опорное импульсное напряжение с минимальной постоянной частотой F_0 и скважностью $Q = 2$. Управляющее напряжение поступает на опорные входы модулятора 3, синхронного детектора 6 и схемы совпадения 10.

При воздействии импульсных помех осуществляется их выделение, после чего из их передних фронтов формируются последовательности кратковременных импульсов управления $U(t)$ с длительностью $\tau_{упр} \ll \tau_i$ (рис. 3б). Схема совпадения 10 открывается импульсами опорного напряжения. Во время действия этих импульсов с выхода схемы совпадения на вход управляемого генератора опорного напряжения поступают импульсы управления. В момент времени t_2 , когда совпадает первый управляющий импульс напряжения $U_3(t)$ с импульсом опорного напряжения $U_0(t)$, вырабатывается срез первого импульса управляемого опорного напряжения с длительностью $\Delta T_1/2$ (см. рис. 3в). В результате к модулятору 3 подключается эталонная нагрузка 4 и закрывается схема совпадения 10. Импульсы помехи не поступают в приёмно-усилительный блок, управляющие импульсы не поступают на вход генератора опорного напряжения, т. к. схема совпадения закрыта. Фронт следующего (второго) импульса управляемого опорного напряжения $U_0(t)$ формируется через промежуток времени $\Delta T_1/2$, равный длительности предыдущего импульса управляемого опорного напряжения (см. рис. 3з). При поступлении этого импульса на управляющий вход модулятора 3 ко входу приёмно-усилительного блока подключается антенна 1 и открывается схема совпадения 10.

Если в течение второго импульса опорного напряжения $U_4(t)$ на вход антенны не поступают импульсы помехи, то управляющее напряжение $U_3(t)$ не формируется. Длительность импульса опорного напряжения $U_4(t)$ равна в этом случае максимальной возможной длительности $T_0/2$. Если в течение следующего импульса опорного напряжения $U_4(t)$ в момент t_i на вход антенны поступает импульс помехи, то в это время в блоке 10 формируется управляющий положительный видеоимпульс $U_3(t)$ с длительностью $\tau_{упр} \ll \tau_i$. Поскольку схема совпадения 10 открыта

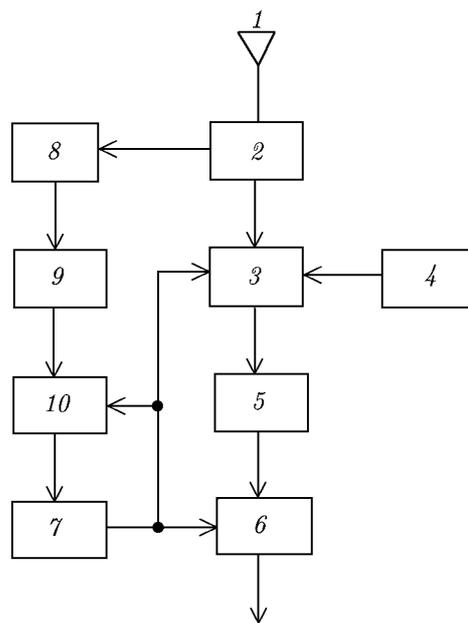


Рис. 4. Структурная схема радиометра с управлением опорным колебанием в соответствии с текущими параметрами импульсных помех: 1 — антенна, 2 — направленный ответвитель, 3 — модулятор, 4 — эталонная нагрузка, 5 — приёмно-усилительный блок, 6 — синхронный детектор, 7 — генератор опорного напряжения, 8, 9 — блоки выделения помех, 10 — схема совпадения

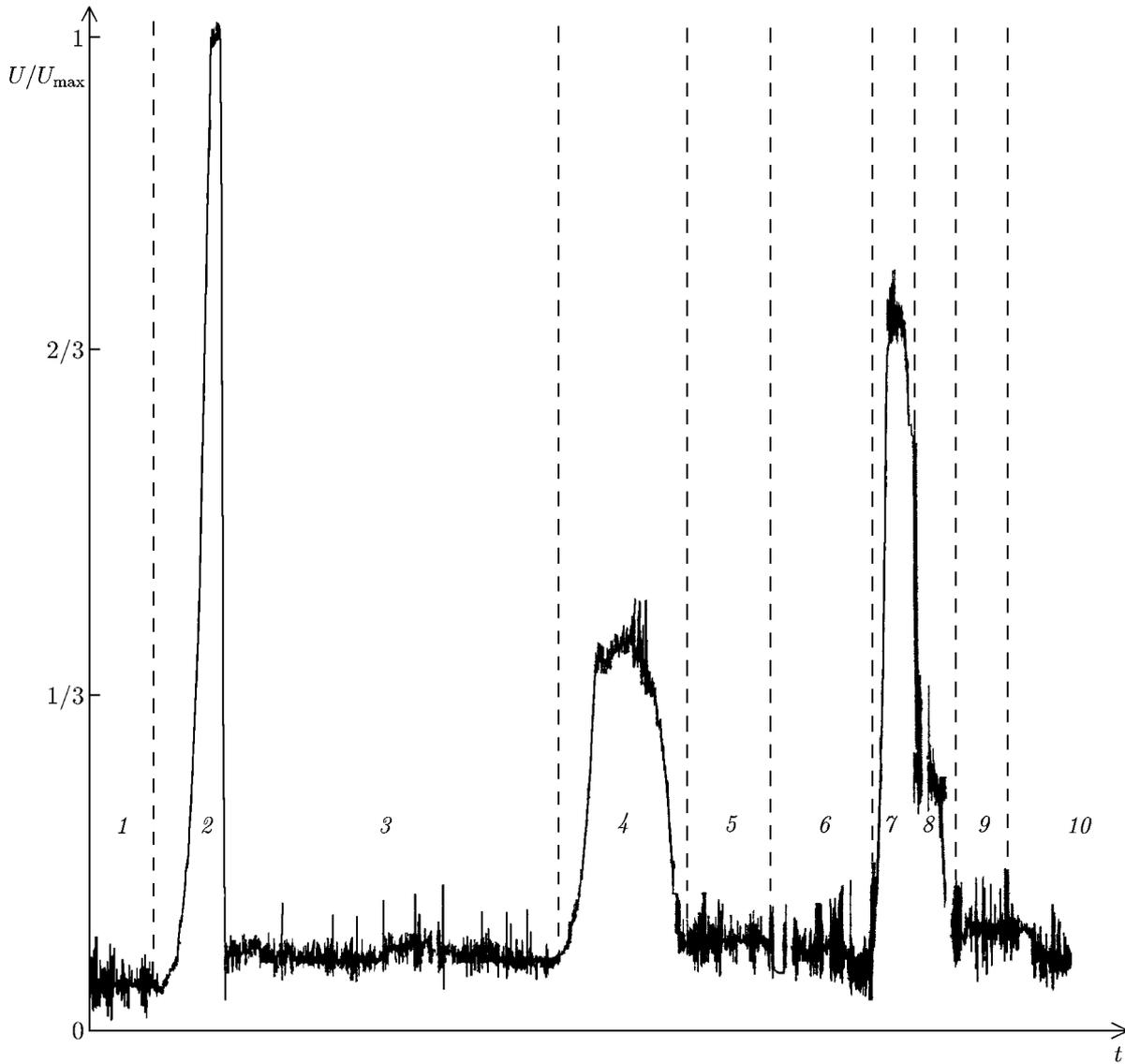


Рис. 5. Запись напряжения на выходе низкочастотного аналога модуляционного радиометра при воздействии помех. На участках 1 и 10 помеха отсутствует, на участке 2 присутствуют импульсы помехи с длительностью $\bar{\tau}_n = 0,75$ мкс, и частотой следования $\bar{F}_n = 6,5 \cdot 10^4$ Гц, на участке 3 — $\bar{\tau}_n = 0,75$ мкс, $\bar{F}_n = 20 \div 6,5 \cdot 10^4$ Гц, на участке 4 — $\bar{\tau}_n = 21$ мкс, $\bar{F}_n = 2,5 \cdot 10^4$ Гц, на участке 5 — $\bar{\tau}_n = 21$ мкс, $\bar{F}_n = 200 \div 2 \cdot 10^3$ Гц, на участке 6 — $\bar{\tau}_n = 21 \div 750$ мкс, $\bar{F}_n = 65$ Гц, на участке 7 — $\bar{\tau}_n = 75$ мкс, $\bar{F}_n = 20$ Гц, на участке 8 — $\bar{\tau}_n = 21$ мкс, $\bar{F}_n = 20$ Гц, на участке 9 — $\bar{\tau}_n = 0,75$ мкс, $\bar{F}_n = 20$ Гц. На участках 1, 2 и 7–10 работает генератор опорного напряжения без управления, на участках 3–6 — управляемый генератор

импульсом опорного напряжения $U_3(t)$, то управляющий импульс $U_2(t)$ поступает в момент времени t_i на управляющий вход генератора опорного напряжения. В результате последний формирует срез второго импульса опорного напряжения с длительностью $\Delta t_2/2$ (см. рис. 3б). В течение второго импульса опорного колебания с длительностью $\Delta T_2/2$ антенна подключена через модулятор к входу приёмно-усилительного блока. Передний фронт следующего импульса опорного напряжения формируется через интервал времени $\Delta t_2/2$, равный длительности второго импульса опорного напряжения $U_4(t)$. В течение этого времени к входу приёмно-усилительного блока 5

через модулятор 3 подключается эталонная нагрузка 4. При этом импульсы помех не поступают на вход блока 5. Дальнейшее управление осуществляется аналогично.

Таким образом, из импульса помехи, поступающего на вход антенны во время положительных импульсов управляющего напряжения $U_n(t)$, формируется кратковременный импульс, проходящий в приёмно-усилительный тракт и совпадающий по длительности с импульсами управления. В результате кратковременные помехи, обусловленные прошедшими в приёмно-усилительный блок фронтами импульсов, имеют значительно большую скважность ($Q > 100$), чем скважность импульсных помех на входе антенны. В результате погрешность δ_n будет существенно меньше, чем при управлении опорным колебанием по срезам импульсных помех. Более того, эти кратковременные помехи могут эффективно подавляться [15]. Вследствие кратковременности этих помех по сравнению с периодом опорного колебания $\tau_{упр} \ll \Delta T_1$, уменьшается влияние нестационарных и нелинейных эффектов, возникающих при их воздействии, на точность измерения [16].

На рис. 5 приведена запись напряжения на выходе низкочастотного аналога модуляционного радиометра при различных статистических параметрах потока импульсных помех. Эксперимент проводился в следующих условиях. На вход радиометра (постоянная времени интегрирования 1 с, частота неуправляемого генератора опорного напряжения 20 Гц) с имитатора сигнально-помеховой обстановки поступает смесь полезного шумового сигнала $U_{шэфф} = 0,1 \div 0,5$ В и импульсных помех со следующими параметрами: средняя частота следования 20 Гц $< \bar{F}_n < 65$ кГц, длительность $0,75$ мкс $< \bar{\tau}_i < 750$ мкс, амплитуда импульсов 1 В $< U_n < 2,5$ В.

Из рис. 5 видно, что в отсутствие помех (участки 1, 10) на выходе блока низкой частоты напряжение обусловлено полезным сигналом. На участках 2, 7 и 8 при модуляционном приёме без адаптивного изменения мгновенной частоты опорного напряжения накапливается ошибка измерения с увеличением коэффициента заполнения потока помех (рост параметров \bar{F}_n и $\bar{\tau}_i$). Адаптивное управление частотой F_0 опорного генератора в соответствии с предложенным выше способом формирования опорного напряжения устраняет действие помех (участки 3, 5, 6, 9 на рис. 5). Работа системы адаптации эффективна до тех пор, пока скважность потока $Q_i > 2$. В том случае, когда $Q_i < 2$ (участок 4), полного подавления помехи не происходит.

Таким образом, адаптивное изменение мгновенной частоты опорного генератора в соответствии с мгновенной частотой помехи позволяет практически полностью устранить действие помехи, скважность которой больше 2.

ВЫВОДЫ

В целях сохранения модуляционного принципа измерений, управление временными параметрами принимаемого сигнала (частотой следования опорного колебания) должно проводиться таким образом, чтобы мощность эталонного излучения измерялась во время действия помехи.

Формирование опорного напряжения в соответствии с измеряемыми временными параметрами импульсных помех эффективно при воздействии периодических и квазипериодических импульсных помех. При воздействии хаотических импульсных помех при таком способе формирования опорного напряжения возможны погрешности за счёт асимметрии опорного напряжения и прохождения части помех в приёмный тракт.

При воздействии хаотических импульсных помех с текущей скважностью $Q \geq 2$ эффективна защита модуляционного радиометра путём формирования опорного напряжения в соответствии с текущими параметрами импульсных помех.

Работа выполнена при поддержке Правительства Российской Федерации (грант 11.G.34.31.0066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li L., Gaiser P. G., Bettenhausen M. H., Johnston W. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2006. V. 44, No. 3. P. 530.
2. Fanise P., Pardé M., Zribi M., et al. // Sensors. 2011. V. 11. P. 3037.
3. Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г., Ильин Г. Н. Борьба с помехами GSM на РАТАН-600: Отчёт Спец. астрофиз. обсерватории РАН 2004–2005 гг.
4. Цыбулев П. Г., Берлин А. Б., Нижельский Н. А. и др. // Астрофиз. бюлл. 2007. Т. 62, № 2. С. 208.
5. Ellingson S. W., Hampson G. A. // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2003. V. 147. P. 167.
6. Jeffs B. D., Li L., Warnick K. F. // IEEE Trans. Signal Processing. 2005. V. 53, No. 2. P. 439.
7. Ellingson S. W., Bunton J. D., Bell J. F. // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2001. V. 135. P. 87.
8. Yampson G., Ellingson S. Modular digital backends for microwave radiometry. The Ohio State University, 2002.
9. Ellingson S. W., Hampson G. A., Johnson J. T. Design of an L-band microwave radiometer with active mitigation of interference. The Ohio State University. <http://www.ece.vt.edu/swe/mypubs/estc.pdf>.
10. Пат. № 2022286 РФ. Модуляционный радиометр / В. С. Лебедев, И. Я. Орлов, В. А. Кошечкин. Заявл. 30.01.1991; Опубл. 30.10.1994. Бюл. № 20.
11. Николаев А. Г., Перцов С. В. Радиотеплолокация (пассивная радиолокация). М.: Сов. радио, 1964. 335 с.
12. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределённости и адаптации информационных систем. М.: Сов. радио, 1977. 432 с.
13. Линдсей В. Системы синхронизации связи и управления. М.: Сов. радио, 1978. 600 с.
14. Коновалов В. Г., Тарасенко Е. М. Импульсные случайные процессы в электросвязи. М.: Связь, 1973. 303 с.
15. Защита от радиопомех / Под ред. М. В. Максимова. М.: Сов. радио, 1976. 496 с.
16. Кульпин С. И., Кузьмин В. Г., Орлов И. Я. // Датчики и системы, 2003. № 4. С. 16.

Поступила в редакцию 19 марта 2014 г.; принята в печать 14 августа 2014 г.

**ON PROTECTION OF THE MODULATION RADIOMETER
AGAINST PULSE INTERFERENCE BY CONTROLLING THE FREQUENCY
OF THE REFERENCE OSCILLATION**

I. Ya. Orlov and S. D. Snegirev

We have developed methods for adaptation of the modulation radiometer under the conditions of *a priori* uncertainty of time distribution of time interference. Two ways of forming the reference voltage are proposed: one according to the measure time parameters of the pulse interference, and the other according to the current parameters of the pulse interference.