

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ АВТОДИННОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ОТВЕТНОГО СИГНАЛА РАДИОЗОНДА ПО ДАЛЬНОСТИ

Носков В. Я., Иванов В. Э., Игнатков К. А., Кудинов С. И.
Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. Первого президента России Б. Н. Ельцина
Екатеринбург, Россия
e-mail: noskov@oko-ek.ru

Аннотация — Дано описание принципа действия и структурной схемы предлагаемого для системы радиозондирования атмосферы автодинного приёмо-передатчика, обладающего улучшенными показателями по электромагнитной совместимости по сравнению с применяемыми в настоящее время свержегенеративными устройствами. Представлены результаты теоретических исследований работы автодина в режиме приёма сигналов запросного радиолокатора.

I. Введение

К основным особенностям бортовых активных приёмо-ответчиков радиозондов систем дистанционного радиозондирования атмосферы относятся такие специфические требования к ним, как экономичность, малые габаритные размеры и низкая стоимость СВЧ приёмо-передающих модулей [1]. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют применяющиеся с конца пятидесятих годов прошлого столетия и до наших дней свержегенеративные приёмо-передатчики (СПП).

В основе принципа действия СПП используется свержегенеративный эффект радиоимпульсного генератора, состоящий в вариациях параметров колебаний в переходном режиме под воздействием принимаемого антенной излучения [2]. Реакция СПП в виде кратковременного прерывания генерации («метки») используется в запросном радиолокаторе для определения дальности до зонда, а телеметрическая информация о состоянии атмосферы непрерывно передаётся посредством частотной модуляции суперпрерирующих импульсов. СПП отличаются высокой чувствительностью и большим усилением принимаемого сигнала, поэтому они постоянно развиваются и совершенствуются. Их недостаток заключается в большой ширине спектра излучения, что в последнее время стало создавать известные проблемы электромагнитной совместимости радиосредств.

Альтернативой СПП являются автодинные приёмопередатчики [3] (АПП), которые конструктивно и функционально ничем не отличаются от первых, но до настоящего времени ещё не нашли своё использование в системах радиозондирования, хотя ряд их положительных свойств, особенно в части необходимой полосы частот, представляются привлекательными. В настоящей работе представлены результаты теоретического обоснования идеи применения АПП вместо СПП.

II. Принцип действия АПП и его структурная схема

Принцип действия АПП основан на использовании автодинного эффекта, состоящего в вариациях параметров автоколебаний стационарного режима генератора под воздействием принимаемого антенной излучения [4]. В режиме передачи телеметрической информации автодин может работать как обычный генератор непрерывных колебаний. Передача

информации на наземную станцию в этом случае осуществляется, например, посредством узкополосной частотной модуляции излучения.

В режиме приёма запросного сигнала радиолокатора автодин обеспечивает возможность преобразования частоты принимаемого сигнала и перенос его спектра (в режиме «биений») на промежуточную частоту, если частота этого сигнала находится за пределами полосы синхронизации автодинного генератора. В случае нахождения частоты сигнала в полосе синхронизации происходит «захват» колебаний автодина, вызывающий также изменения режима автоколебаний (частоты и амплитуды генерации, среднего значения смещения на активном элементе). При этом благодаря неизохронности реальных СВЧ генераторов происходит прямая демодуляция частотной модуляции входного сигнала [5]. В результате этого выделяется низкочастотный сигнал «запроса». Последний случай является наиболее интересным для использования в системе радиозондирования, поскольку при этом обеспечивается её «одночастотный» режим работы. Кроме того, в такой системе «захваченный» генератор ответчика выполняет функции усилителя мощности возвращаемого к радиолокатору излучения.

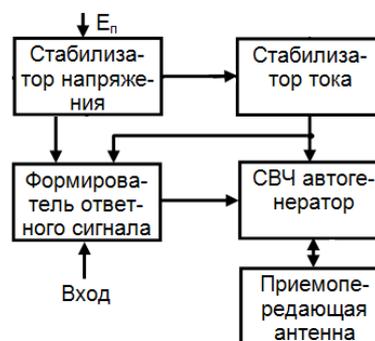


Рис. 1. Структурная схема АПП радиозонда.

Fig. 1. Functional block diagram of a radiosonde autodyne transceiver

Обнаружение указанных изменений режима колебаний автодинного генератора при воздействии на него запросного радиоимпульса радиолокатора, как в случае «биений», так и в случае «захвата» частоты, обеспечивает возможность формирования в излучении автодина ответной «метки» в виде, например, кратковременного прекращения генерации (паузы). В принципе, сами изменения режима генерации автодина, как «метка» в ответном сигнале, могут быть обнаружены наземным приёмником радиолокационной станции. По временному положению этой «метки» в сигнале АПП в приёмнике радиолокатора относительно запросного радиоимпульса есть возможность определения расстояния до шара-зонда, а при условии когерентности излучения радиолокатором

сигналов запроса — радиальной скорости по величине доплеровского смещения частоты и направленной относительного перемещения.

В соответствии с описанным принципом действия АПП разработана его структурная схема, приведенная на рис. 1. Все узлы приемо-передающего устройства предлагаемого АПП заимствованы из серийного радиозонда МРЗ-3 [1]. Отличительная особенность заключается во введении узла формирователя ответного сигнала, который, по существу, является полосовым фильтром и усилителем сигнала биений между запросным сигналом и колебаниями СВЧ-генератора. Выходной сигнал этого генератора подается на формирователь ответного сигнала, обеспечивающий выключение СВЧ-модуля на 1 мкс, тем самым создавая ответный сигнал АПП в виде паузы.

III. Основные уравнения для анализа

Модель СВЧ генератора представим в виде параллельного соединения колебательного контура, нелинейной комплексной проводимости активного элемента (АЭ) и двух эквивалентных генераторов тока наводимого сигнала запроса и внутренних шумов генератора. Цепь автосмещения АЭ первого порядка содержит также эквивалентные источники ЭДС шумов и модуляции в цепи питания генератора. Решая составленную на основании законов Кирхгофа исходную систему уравнений методами теории нелинейных колебаний и выполнив линеаризацию укороченных уравнений в окрестности режима стационарных колебаний после элементарных преобразований получим неоднородную систему линеаризованных уравнений для определения относительных автодинных изменений автосмещения $a_0 = u_0/U_0$, амплитуды $a_1 = a/A_0$ и частоты $\Delta\omega/\omega_0 = (\xi_{11}/\omega_c)(d\delta/dt)$ колебаний в виде:

$$T_0 \frac{da_0}{dt} + \alpha_{00}a_0 + \alpha_{01}a_1 + \frac{\varepsilon_{01}}{\omega_c} \frac{d\delta}{dt} = e_{ш0}(t) + e_{мод0}(t), \quad (1)$$

$$\frac{Q_H}{\omega_c} \frac{da_1}{dt} + \alpha_{10}a_0 + \alpha_{11}a_1 + \frac{\varepsilon_{11}}{\omega_c} \frac{d\delta}{dt} = \Gamma\eta_1 \cos\delta + a_c(t), \quad (2)$$

$$\frac{\xi_{11}}{\omega_c} \frac{d\delta}{dt} + \frac{Q_H}{\omega_c} [\omega(t) - \omega_0] + \beta_{10}a_0 + \beta_{11}a_1 = -\Gamma\eta_1 \sin\delta - a_s(t), \quad (3)$$

где $T_0, T_1 = 2Q_H/\omega_c$ — постоянные времени цепи автосмещения и резонатора; $e_{ш0}(t) = e_{0ш}(t)/E_0$, $e_{мод0}(t) = e_{0мод}(t)/E_0$ — относительные уровни шумов и модуляции источника питания; $\alpha_{00} = 1 + R_0(\partial I/\partial U)_0$ — коэффициент регенерации низкочастотной цепи автодина; $\alpha_{01} = R_0(A_0/U_0)(\partial I/\partial A)_0$ — безразмерный параметр, учитывающий явление автодетектирования автодинного сигнала; $\varepsilon_{01} = R_0(\omega_0/U_0)(\partial I/\partial \omega)_0$ — параметр, определяющий вклад в изменения автосмещения изменений частоты генерации (частотное детектирование); $\alpha_{10} = (U_0/2G_{30})(\partial G_3/\partial U)_0$ — параметр, учитывающий явления модуляции и автомодуляции амплитуды колебаний при реакции цепи автосмещения генератора; $\alpha_{11} = (A_0/2G_{30})(\partial G_3/\partial A)_0$ — приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла; $\varepsilon_{11} = (\omega_0/2G_{30})(\partial G_3/\partial \omega)_0$ — параметр неизодромности генератора, учитывающий влияние изменений частоты на амплитуду колебаний; $\beta_{10} = (U_0/2B_{30}) \cdot (\partial B_3/\partial U)_0 \text{tg}\Theta$ — параметр, определяющий модуляционную чувствительность частоты генератора к малым изменениям автосмещения; $\beta_{11} = (A_0/2B_{30}) \cdot (\partial B_3/\partial A)_0 \text{tg}\Theta$ — безразмерный параметр, определяющий неизохронность генератора;

$\xi_{11} = -(\omega_0/2B_{30}) \cdot [(\partial B_3/\partial \omega)_0 + (\partial B/\partial \omega)_0] \text{tg}\Theta$ — параметр стабилизации частоты автоколебаний, учитывающий изменение частотной крутизны реактивных проводимостей АЭ $\partial B_3/\partial \omega$ и резонансной системы генератора $\partial B/\partial \omega = 2GQ_H/\omega_c$ на автодинные изменения частоты; $\eta_1 = Q_H/Q_{вн}$ — кпд колебательной системы.

Представленные здесь уравнения (1)—(3) обладают достаточно широкой общностью, так как обеспечивают возможность анализировать явления синхронизации колебаний и режима биений, автодинного эффекта и трансформации шумов в СВЧ генераторах с любым типом АЭ (туннельные диоды, диоды Ганна, полевые и биполярные транзисторы). Отметим, что в случае СВЧ генераторов, выполненных на ЛПД (вольт-амперная характеристика этих приборов S-типа), полученные результаты являются также справедливыми при условии дуальной замены основных понятий: ток \leftrightarrow напряжение, проводимость \leftrightarrow сопротивление и т.п.

III. Результаты теоретического анализа режима синхронизации

С целью исследования наиболее общих характеристик и особенностей проявления автодинного эффекта при синхронизации в различных генераторах, проведем анализ модели автодинного генератора в малосигнальном приближении. При этом не будем пока учитывать собственные шумы генератора ($a_c(t) = a_s(t) = 0$) и шумы источника питания ($a_0 = 0$). Пренебрегаем также влиянием «частотного автодетектирования» ($\varepsilon_{11} = 0$). В рамках указанных приближений из (1)—(3) запишем:

$$\frac{da_1}{dt} = -\frac{\omega_c}{Q_H} \alpha_{11} a_1 + \Gamma \frac{\omega_c}{Q_{вн}} \cos\delta, \quad (4)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = -[\omega(t) - \omega_0] - \frac{\omega_c}{Q_H} \beta_{11} a_1 - \Gamma \eta_1 \frac{\omega_c}{Q_H} \sin\delta. \quad (5)$$

В режиме установившихся колебаний, полагая производные в левой части уравнений (4), (5) равными нулю, получим:

$$a_1 = \Gamma \frac{Q_H}{Q_{вн} \alpha_{11}} \cos\delta = \Gamma \eta_1 \frac{1}{\alpha_{11}} \cos\delta, \quad (6)$$

$$\Delta\omega = -\Gamma \frac{\omega_c}{Q_{вн} \cos\theta} \sin(\delta + \theta), \quad (7)$$

где $\Delta\omega = \omega(t) - \omega_0$ — отклонение частоты внешнего сигнала от собственной частоты автодинного генератора; $\gamma = \beta_{11}/\alpha_{11}$ — коэффициент неизохронности генератора; $\theta = \text{arctg}\gamma$ — угол смещения характеристики (7), обусловленный неизохронностью генератора.

Множитель перед синусом в (7) имеет смысл максимальных отклонений частоты $\omega(t)$ (амплитуды отклонений) внешнего сигнала от частоты ω_0 при синхронизации:

$$\Delta\omega_{\text{макс}} = -\Gamma \frac{\omega_c}{Q_{вн} \cos\theta}. \quad (8)$$

Выражения для полосы синхронизации $\Delta\omega_c = 2\Delta\omega_{\text{макс}}$ с учётом соотношения (7) и соотношения мощностей входного сигнала P_c и выходной мощности $P_{\text{пер}}$ автодинного генератора (см. экспликации к (1)—(3)) запишем в виде:

$$\Delta\omega_{\text{макс}} = -2 \sqrt{\frac{P_c}{P_{\text{пер}}}} \frac{\omega_c}{Q_{вн} \cos\theta}. \quad (9)$$

Из (7) легко найти пределы изменения установившейся фазы δ_0 автодинного генератора при его синхронизации:

$$\delta_0 = -(\theta + \arcsin\chi_c), \quad (10)$$

где $\chi_c = \Delta\omega/\Delta\omega_{\max}$ — относительное отклонение частоты внешнего сигнала от собственной частоты автодинного генератора. Подставив (10) в (6), получим выражение для нормированной амплитудно-частотной характеристики $a_{1н}(\chi_c)$ (АЧХ) синхронизированного автодинного генератора:

$$a_{1н} = a_{1н}(\chi_c) = \frac{a_1}{a_{1м}} = \cos(\theta + \arcsin\chi_c), \quad (11)$$

где $a_{1м} = \Gamma k_a = (P_c/P_{\text{пер}})^{1/2} k_a$ — максимальные изменения амплитуды колебаний генератора в полосе синхронизации; $k_a = Q_H/Q_{Вн}\alpha_{11}$ — коэффициент автодинного усиления. Отметим, что аналогичное (11) получается выражение для характеристики автодетектирования (ХАД).

Результаты расчётов АЧХ $a_{1н}(\chi_c)$ при различных значениях коэффициента неизохронности γ (кривая 1 — $\gamma = 0$; 2 — $\gamma = 0,5$; 3 — $\gamma = 1,0$; 4 — $\gamma = 1,5$) представлены на рис. 2. Эти графики показывают нормированную величину изменений амплитуды колебаний генератора $a_{1н}$ в зависимости от величины относительной отстройки частоты χ_c воздействующего сигнала. Из этих графиков видно, что в центре полосы синхронизации наблюдается наибольшая реакция амплитуды колебаний у изохронного генератора, у которого $\gamma = 0$ (см. рис. 2, кривая 1). У реальных СВЧ генераторов, как правило, имеет место значительная неизохронность колебаний [4] ($\gamma = 1 \dots 1,5$). Поэтому у этих генераторов в центре полосы синхронизации не может гарантироваться максимальный по амплитуде отклик, причём на краях этой полосы полярность отклика может иметь разные знаки (см. рис. 2, кривые 2...4).

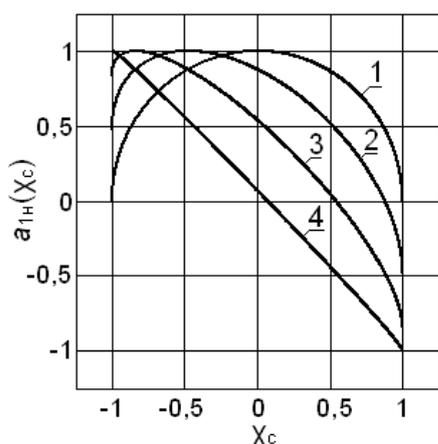


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики.

Fig. 2. Amplitude frequency responses

Необходимо отметить, что при $\gamma \sim 1,5$ и более, АЧХ синхронизированного генератора вырождается практически в прямую линию (см. кр. 4). Такой вид АЧХ обеспечивает высокую линейность преобразования ЧМ \rightarrow АМ входного сигнала. Детектирование этих амплитудных изменений с помощью внешнего детектора или автодетектирование их в цепи питания обеспечивает демодуляцию ЧМ. Отсюда следует, что в качестве запросного сигнала желательно использовать радиоимпульсы в внутренней частотной модуляции, содержащей код «запроса».

IV. Заключение

Результаты выполненных теоретических исследований автодинов дали положительный ответ на вопрос о принципиальной возможности замены СПП на АПП в перспективных системах радиозондирования атмосферы.

Узкая полоса излучения автодина обеспечивает его преимущества перед сверхрегенератором, что является важным для обеспечения требований электромагнитной совместимости радиосредств. Кроме того, в настоящее время достигнуты достаточно высокие показатели качества автодинных приёмопередающих модулей [3], разработанных на современной элементной базе и в широком диапазоне частот. Данные достижения в создании и производстве СВЧ модулей вызывают интерес в плане их использования во вновь создаваемых системах радиозондирования атмосферы, в том числе в коротковолновой части сантиметрового диапазона, а также миллиметровых волн.

Дальнейшие исследования АПП предполагается направить на изучение переходных процессов, динамических и шумовых характеристик автодинов с учётом их внутренних свойств в различных режимах: при нахождении запросного сигнала в полосе синхронизации и при наличии значительной отстройки от неё.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с постановлением Правительства №218 от 09.04.2010г.

IV. Список литературы

- [1] Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. Радиозондирование атмосферы: Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 606 с.
- [2] Сверхрегенераторы / М. К. Белкин, Г. И. Кравченко, Ю. Г. Скоробутов, Б. А. Стрюков. М.: Радио и связь, 1983. 248 с.
- [3] Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 1. Конструкторско-технологические достижения // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 12. С. 3—30.
- [4] Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 2. Теоретические и экспериментальные исследования // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 7. С. 3—33.
- [5] Радиотехнические устройства СВЧ на синхронизированных генераторах / Н. Н. Фомин, В. С. Андреев, Э. С. Воробейчиков и др.; Под ред. Н. Н. Фомина. М.: Радио и связь, 1991. 192 с.

THEORETICAL GROUNDS OF AUTODYNE METHOD OF FORMING RESPONSE SIGNALS OF A RADIOSONDE FOR DISTANCE MEASUREMENTS

Noskov V. Ya., Ivanov V. A., Ignatkov K. A., Kudinov S. I.
Ural Federal University (UrFU)
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
Yekaterinburg, Russia
e-mail: noskov@oko-ek.ru

Abstract — This report describes the operation principle and block diagram of the autodyne transceiver proposed for the atmosphere radio probing system. The transceiver has better electromagnetic compatibility as compared with currently used superregenerative devices. There are theoretical investigation results of the autodyne operating mode as a receiver of signals from a requesting radar.