



УДК 621.396.96

В. М. Кутузов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Многополосный режим автоколебаний в РЛС с положительной обратной связью

Предложен и проанализирован многополосный режим автоколебаний в РЛС с положительной обратной связью (ПОС) через пространство и цель, не ухудшающий характеристики скрытности работы при параллельном обзоре пространства по дальности. Показаны преимущества РЛС с ПОС по сравнению с известной схемой на основе кодового разделения каналов приема.

РЛС с пространственной обратной связью, автогенератор с запаздыванием, многоканальный режим, частотное разделение каналов, энергетическая скрытность работы

Основным преимуществом РЛС с положительной обратной связью (ПОС) через пространство и цель является высокая энергетическая и информационная скрытность их работы, поскольку при отсутствии целей в зоне обзора излучаются маломощные собственные шумы системы, а мощность автоколебаний нарастает только при появлении цели в просматриваемом элементе дистанции [1]. Физическая модель таких радиолокационных станций представляет собой автогенератор с задержанной положительной обратной связью [2]. Автоколебания в такой системе могут возникать на регулярной сетке частот $F_n = n/T$, где n – целое положительное число; T – задержка сигнала в петле обратной связи. Если полоса фильтра в цепи обратной связи $\Delta f \geq 1/T$, выполнение баланса фаз гарантировано. При наличии цели с достаточной эффективной площадью рассеяния (ЭПР) и компенсации потерь на трассе распространения сигнала за счет усиления в приеме-передающем тракте радиолокатора выполняется условие баланса амплитуд. При этом результирующий коэффициент усиления в петле обратной связи $K_{OC} \geq 1$ и в замкнутой системе "РЛС–пространство–цель" возникают экспоненциально нарастающие автоколебания. Скорость нарастания автоколебаний тем выше, чем больше коэффициент усиления в петле обратной связи K_{OC} , и обратно пропорциональна времени задержки T

Очевидно, что при любых $K_{OC} \geq 1$ и $\Delta f \geq 1/T$ нарастание автоколебаний в системе с задержанной обратной связью не может происходить быстрее, чем время циркуляции сигнала в петле обратной связи. Следовательно, время задержки T выступает в роли интервала дискретизации, необходимого, по аналогии с теоремой Котельникова, для однозначного представления нарастающих автоколебаний в системе. Последнее обстоятельство делает целесообразным анализ переходных процессов в РЛС с ПОС в нормированном к длительности задержки безразмерном времени $\theta = t/T$.

Для измерения и разрешения целей по дальности в РЛС с ПОС используется модуляция узкополосного шума на выходе фильтра сигналом $z(t)$ и последующая корреляционная обработка задержанного на интервал времени τ отраженного сигнала $x(t - \tau)$ в приемнике [1]. Модулированный сигнал $x(t)$ имеет спектр шириной $\Delta F \gg \Delta f$, достаточный для обеспечения заданного разрешения по дальности. При этом баланс амплитуд, необходимый для возникновения автоколебаний, возможен только в том случае, если задержка отражаемого целью нарастающего сигнала соответствует задержке опорного сигнала коррелятора. В этом случае происходит демодуляция и сжатие энергии принимаемого сигнала в спектральной области, полностью попадающей в узкополосный фильтр обратной связи. Для просмотра всех эле-

ментов дальности необходимо последовательно изменять задержку поступающего на коррелятор опорного сигнала от τ_{\min} до τ_{\max} . Для попадания одной из возможных частот автоколебаний в полосу прозрачности узкополосного фильтра и гарантии выполнения баланса фаз в тракт приема должна быть включена дополнительная линия задержки, время задержки которой необходимо изменять в зависимости от просматриваемого элемента дистанции так, чтобы выполнялось условие

$$\tau_q + \tau_a = T = 1/\Delta f, \quad (1)$$

где τ_q – ожидаемая пространственная задержка сигнала в q -м канале дальности; τ_a – дополнительная аппаратная задержка.

Структурная схема РЛС с ПОС со сложномодулированным квазинепрерывным сигналом и последовательной корреляционной обработкой представлена на рис. 1 [2]. РЛС содержит усилитель мощности УМ, работающий в линейном режиме, и малощумящий усилитель МУ. Выход УМ и вход МУ подключены через антенный переключатель АП к приемопередающей антенне. Управляет работой АП кодирующее устройство КУ, которое также вырабатывает модулирующий сигнал $z(t)$, управляющий модулятором М, и задержанную копию этого сигнала $z(t - \tau_0)$, управляющую коррелятором Кр. Линия задержки ЛЗ обеспечивает выполнение условия (1), гарантируя попадание возможной частоты автогенерации в полосу прозрачности фильтра Ф. Принципиальным отличием РЛС с ПОС от традиционных когерентных РЛС является то, что выход приемного тракта через узкополосный фильтр Ф обратной связи замкнут по высокой частоте с входом передающего тракта, что делает эту систему неустойчивой при появлении цели в просматриваемом элементе пространства. Нарастание автоколебаний является признаком наличия цели в просматриваемом элементе пространства. Нарастающие автоколебания на выходе узкополосного фильтра Ф сравниваются в пороговом устройстве ПУ с порогом,

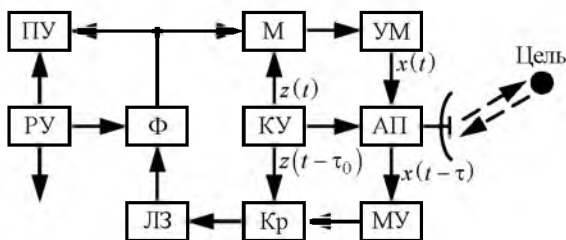


Рис. 1

выбираемым исходя из требуемой вероятности ложной тревоги. После окончания времени анализа $T_a > T$ фильтр обратной связи Ф разряжается по сигналу решающего устройства РУ. Значение T_a может быть постоянным порядка $(10 \dots 30)T$, однако на практике чаще анализ обрывают по достижении нарастающим сигналом автоколебаний порога обнаружения. Это обеспечивает более высокую скрытность работы РЛС с ПОС, поскольку не достигается максимальная мощность излучения.

Очевидным недостатком такой схемы построения РЛС с ПОС является последовательный просмотр каналов по дальности, что при их большом количестве существенно замедляет темп обзора пространства. В принципе, в РЛС с ПОС возможен импульсный режим работы, обеспечивающий многоканальный обзор пространства по дальности, однако в этом случае фильтр обратной связи должен быть широкополосным, поскольку его полоса должна быть согласована с длительностью излучаемого импульса $\tau_{\text{и}}$: $\Delta f \geq 1/\tau_{\text{и}}$. Экспоненциально нарастающие автоколебания в каждом дальностном канале, в котором присутствует своя цель с достаточной ЭПР, примут импульсный характер с периодом следования импульсов $T_{\text{и}} = T$, однако импульсы не будут совпадать во времени, что и обеспечит независимое возникновение колебаний в каналах дальности. К сожалению, импульсный режим работы РЛС с ПОС практически сводит на нет ее преимущества в скрытности работы по сравнению с обычными РЛС, поскольку для обеспечения той же средней мощности излучения $P_{\text{изл}}$ импульсная мощность излучаемых шумов должна быть увеличена пропорционально скважности импульсов $Q = T_{\text{и}}/\tau_{\text{и}}$.

Теоретически в РЛС с ПОС возможна организация многоканального обзора пространства по дальности за счет тиражирования корреляционных каналов приема, каждый из которых настроен на определенную просматриваемую дальность (задержку отраженного сигнала), однако эквивалентной физической моделью в этом случае становится автогенератор с многопетлевой задержанной обратной связью [3]. Поскольку задержки в различных каналах дальности с точностью до длины волны несущего колебания неизвестны, сложно предсказать взаимное влияние каналов на возникающие в них автоколебания. Более того, даже из-за незначительного разброса суммарных

задержек в каналах приема сетка возможных частот автоколебаний f_n также будет различной, что приведет к возможности возникновения колебаний на разных частотах $f_n \pm \delta f_q$, где $\delta f_q < \Delta f/2$ – разброс частоты генерации в пределах полосы прозрачности фильтра обратной связи; q – номер канала дальности. Можно показать [3], что результирующие автоколебания в многопетлевой системе сложным образом зависят как от баланса амплитуд, определяемого K_{OC} , так и от баланса фаз, определяемого τ_q , в каждом канале дальности. Это приводит к непредсказуемым изменениям вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения целей в различных каналах дальности.

Уменьшить негативное взаимное влияние возникающих в каналах дальности автоколебаний можно использованием кодового разделения каналов, для чего в каждый канал необходимо включить отдельный модулятор с индивидуальным опорным модулирующим сигналом $z_q(t)$ и с последующим суммированием выходных сигналов отдельных каналов в сумматоре Σ . Структурная схема РЛС с ПОС с кодовым разделением каналов представлена на рис. 2 (блоки ПУ и РУ в каждом канале для упрощения опущены). Для каждого канала дальности должен существовать свой зондирующий сигнал $x_q(t)$, $q=1, 2, \dots, Q$, причем все сигналы в совокупности должны образовывать ортогональную систему.

К сожалению, необходимость обеспечения ортогональности сигналов в полосе частот Δf при квазинепрерывном режиме работы РЛС на одну антенну и различной скорости нарастания автоколебаний в разных каналах дальности делает эту задачу

трудноразрешимой. Возможна постановка подоптимальной задачи поиска квазиортогональной системы сигналов с уровнем боковых лепестков взаимной функции неопределенности, обеспечивающим снижение взаимного влияния каналов дальности. Недостаток такой постановки заключается в том, что организованный таким образом многоканальный обзор пространства по дальности в РЛС с ПОС приводит к увеличению в K раз спектральной плотности мощности излучаемых шумов в полосе сигнала на первоначальном этапе возникновения автоколебаний, а также при отсутствии целей в зоне обзора [4]. Это существенно снижает показатели энергетической скрытности РЛС с ПОС, являющиеся ее основным преимуществом по сравнению с обычными РЛС.

Более эффективное решение заключается в частотном разделении каналов дальности. В этом случае в качестве фильтров обратной связи в схеме РЛС с ПОС (рис. 3) необходимо использовать узкополосные фильтры с одинаковой полосой пропускания $\Delta f = \text{const}$, каждый из которых настроен на одну из возможных, но не повторяющихся частот генерации $f_1, f_2, \dots, f_q, \dots, f_Q$.

При этом необходимо обеспечить частотный разнос соседних узкополосных фильтров не менее чем на ширину спектра модулированного сигнала ΔF :

$$|f_{q+1} - f_q| \geq \Delta F, \quad (2)$$

что обеспечивает независимое возбуждение колебаний в каждом канале дальности. При этом для каждого канала дальности при замыкании петли обратной связи через пространство и цель баланс фаз и баланс амплитуд носят индивидуальный характер. Выполнение баланса фаз по-прежнему гарантируется соблюдением условия (1). Для выполнения баланса амплитуд необходимо, чтобы сум-

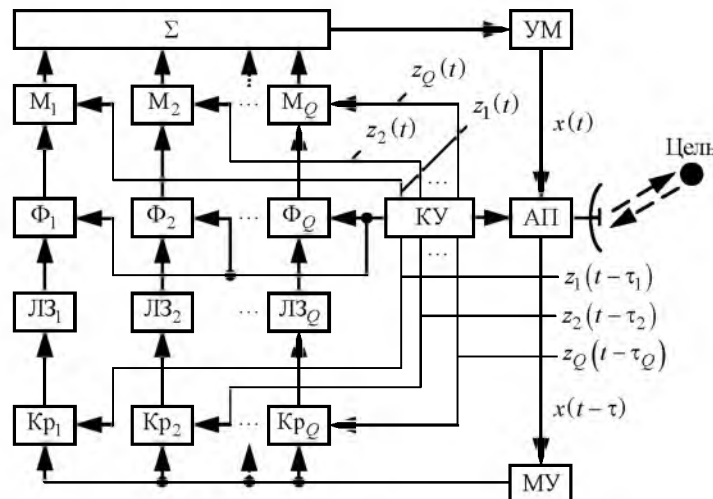


Рис. 2

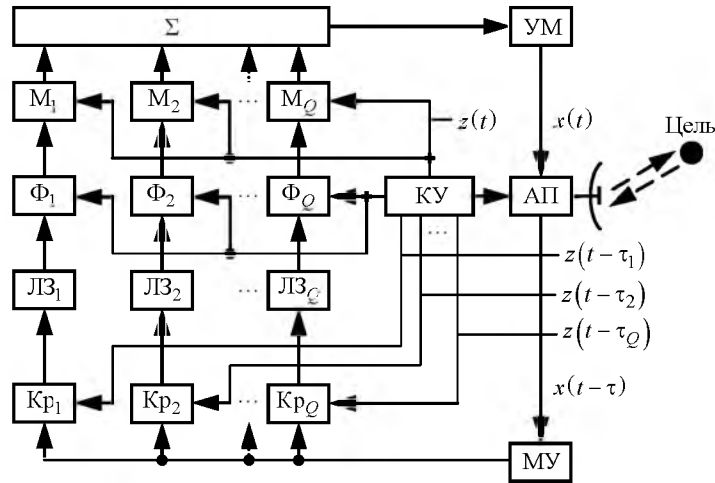


Рис. 3

марный коэффициент усиления в петле обратной связи $K_{OC} \geq 1$. Это эквивалентно условию компенсации потерь сигнала на трассе распространения "пространство-цель" за счет усиления сигнала в приемопередающем тракте РЛС. Требуемый коэффициент усиления в тракте РЛС определяется как $K \geq P_{изл}/P_{пр}$, где $P_{изл}$ – выходная мощность, излучаемая в пространство передающим блоком; $P_{пр}$ – мощность собственных шумов приемного блока в полосе Δf . На основе известного уравнения радиолокации минимальное значение K_{min} при котором $K_{OC} = 1$, можно определить как

$$K_{min} = \frac{(4\pi)^3 R_q^4 \gamma^2 W_q}{G^2 \lambda^2 \sigma} \quad (3)$$

где R_q – дальность до цели в q -м канале; γ – ослабление мощности сигнала на трассе распространения; $W_q \leq 1$ – значение нормированной функции приема квазинепрерывного сигнала для q -го канала дальности при работе на одну антенну [1]; G – коэффициент усиления приемопередающей антенны; λ – длина волны несущего колебания; σ – эффективная площадь рассеяния цели. При этом предполагается, что все каскады приемопередающего тракта в момент возникновения и нарастания автоколебаний согласованы по уровню входных и выходных шумов и работают в линейном режиме.

Как следует из выражения (3), РЛС с ПОС обладает уникальным свойством – ее характеристики обнаружения и, следовательно, дальность действия не зависят от чувствительности приемника, а определяются только суммарным коэффициентом усиления приемопередающих цепей и антенного устройства [5]. Физическая сущность этого свойства

очевидна: снижение чувствительности приемника РЛС эквивалентно увеличению мощности шумов приемника, которые, после соответствующего усиления, поступают в передатчик и обеспечивают более высокую мощность излучаемого сигнала.

Выполнение баланса фаз и амплитуд в q -м канале приводит к появлению экспоненциально нарастающих автоколебаний в полосе прозрачности фильтра обратной связи в соответствующем канале обработки сигналов по дальности. При обнаружении нарастающих автоколебаний – признака наличия цели – возможно их досрочное прерывание в узкополосных фильтрах обратной связи, что гарантирует работу блоков РЛС в линейном режиме. При этом время анализа T_a возникающих автоколебаний во всех Q каналах дальности должно быть согласовано с суммарным временем задержки T . Как правило, на практике достаточным для надежного возникновения автоколебаний и их обнаружения является значение $T_a = (10...30)T$.

Суммарная ширина спектра излучаемого шумового сигнала ΔF_{Σ} при частотном разделении каналов дальности составляет $\Delta F_{\Sigma} = Q\Delta F$ при условии, что расстояние между соседними каналами постоянно и равно ΔF , а расстояние между крайними каналами – $(Q-1)\Delta F$ (рис. 4). Сравни-

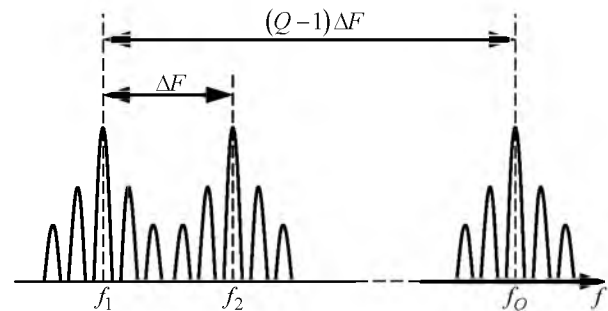


Рис. 4

вая спектральный состав излучаемых колебаний при кодовом и при частотном разделении каналов дальности в РЛС с ПОС, можно сделать вывод о более высокой скрытности второго варианта, по-

скольку как при отсутствии целей в зоне обзора, так и на начальном этапе возникновения автоколебаний энергия сигнала распределена в более широкой полосе частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морская радиолокация / В. А. Генкин, В. И. Винокуров, С. П. Калениченко и др.; под ред. В. И. Винокурова. Л.: Судостроение, 1986. 256 с.

2. Попов В. Н., Щербак В. И. Линейный этап установления автоколебаний в генераторе с запаздыванием // Изв. ЛЭТИ. 1977. Вып. 215. С. 22–24.

3. Яковлев В. Н. Генераторы с многопетлевой обратной связью. М.: Связь, 1973. 278 с.

4. Пат. RU 113018 U1 МПК G01S7/28 (2006.01). Радиолокационная станция с положительной обратной связью через цель / С. П. Калениченко, В. А. Сокольников. Опубл. 27.01.2012. Бюл. № 3.

5. Кутузов В. М. Применение авторегрессионных моделей в РЛС с положительной обратной связью // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Сер. Радиоэлектроника и телекоммуникации. 2005. Вып. 1. С. 37–41.

V. M. Kutuzov

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

A multiband self-oscillation mode in radar with a positive feedback

A multiband self-oscillation mode in radar with a positive space and target feedback (PFB) is suggested and analyzed. It does not degrade characteristics of emission security in case of parallel space range surveillance. The suggested design of radar with PFB is compared with the known one on the basis of code division of the receive chains. The advantages of radar with PFB are shown.

Radar with spatial feedback, active oscillator with a delay, multichannel mode, frequency division of channels, power emission security

Статья поступила в редакцию 21 января 2015 г.

УДК 621.396.667

Г. С. Нахмансон, Д. В. Бучнев, А. В. Суслин

Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина
(Воронеж)

Атмосферные искажения траекторий распространения излучения в каналах глиссады радиотехнических систем посадки воздушных судов

Рассмотрены искажения траекторий распространения излучения антенн радиотехнических систем, обеспечивающих каналы глиссады для посадки воздушных судов, обусловленные атмосферной рефракцией. Получены аналитические выражения для построения траекторий распространения излучения. По данным температурно-ветрового зондирования атмосферы рассчитаны траектории распространения излучения и плотности распределения вероятностей их угловых отклонений от номинального угла глиссады на различных дальностях. Определены интервалы углового разброса траекторий относительно линии глиссады для фиксированных достоверных вероятностей.

Показатель преломления, глиссада, радиотехническая система посадки, траектория распространения излучения, рефракционная ошибка

При совершении посадки воздушных судов (ВС) траектория их снижения (глиссада) к взлетно-посадочной полосе определяется углом наклона излучения антенны канала глиссады радиотехниче-

ской системы посадки (РТСП). Так как угол наклона излучения антенн каналов глиссады относительно земной поверхности невелик ($2^{\circ}40' \dots 3^{\circ}15'$), на траекторию распространения излучения в атмосфере