

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗВЯЗКИ ПРИЕМНОГО И ПЕРЕДАЮЩЕГО КАНАЛОВ В ШУМОВЫХ РЛС

Кузьмичев В.Е., Соколов А.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

E-mail: sav@cplire.ru

Сипугин Д.В.

3 ЦНИИ МО РФ

Предложен метод обеспечения развязки приемного и передающего каналов в шумовых РЛС за счет разнесения приемной и передающей антенн.

Известно, что как корреляционный, так и спектральный методы обработки сигнала можно использовать в ШРЛС, работающих как в непрерывном, так и в импульсном режиме излучения [1]. Для обеспечения высокой скрытности работы ШРЛС наиболее подходящим является непрерывный режим излучения, так как при данном уровне мощности он обеспечивает наибольшую энергию излучаемого сигнала.

Однако при использовании в ШРЛС непрерывного режима излучения возникают значительные трудности, связанные с уменьшением чувствительности и дальности действия РЛС ввиду просачивания энергии сигнала передатчика в приемный канал.

Кроме того, даже при значительном снижении уровня мощности просачивающегося сигнала за счет разнесения приемной и передающей антенн, сигналы, отраженные от близко расположенных местных предметов и участков земной поверхности, могут маскировать слабые сигналы, отраженные от целей.

При расположении приемной и передающей антенн рядом трудно получить уровень развязки более -70 дБ относительно уровня зондирующего сигнала [2]. В шумовых РЛС с непрерывным режимом излучения это приводит к существенному снижению их дальности действия.

Из изложенного следует, что для увеличения дальности действия в ШРЛС необходимо предусматривать дополнительные меры по развязке приемного и передающего каналов.

Известны методы поляризационной, частотной и временной развязки каналов в РЛС с непрерывным излучением [3].

Поляризационные методы применительно к широкополосным сигналам в настоящее время еще находятся на стадии освоения.

Частотные методы развязки могут применяться при использовании частотной модуляции зондирующего сигнала, когда отраженные от цели сигналы на входе приемника имеют частоты, существенно отличающиеся от мгновенной частоты излучаемого в данный момент времени сигнала.

В шумовых РЛС мгновенный спектр зондирующего сигнала занимает практически всю полосу анализируемых частот, что не позволяет использовать в ней частотный метод.

Из изложенного следует, что применительно к шумовым РЛС обеспечение развязки между приемным и передающим каналами возможно за счет использования временного разделения их работы.

В качестве функции, описывающей закон модуляции излучения зондирующего сигнала во времени, могут быть выбраны либо меандр, либо М-последовательность. При этом для однозначного измерения доплеровской частоты, как в первом, так и во втором случае необходимо, чтобы частота первой гармоники закона модуляции превышала значение измеряемой с помощью ШРЛС максимальной доплеровской частоты.

Применение режима комбинированного меандра позволяет просматривать удаленные участки дальности при частоте меандра большей максимального значения доплеровской частоты. При этом в худшем случае потери при приеме составляют 3 дБ.

При использовании М-последовательности не нужно изменять форму и длительность коммутирующей последовательности. В этом случае излучаемая мощность, как и в режиме комбинированного меандра, будет меньше по сравнению с непрерывным режимом излучения в 2 раза. В обоих случаях мощность принимаемого отраженного сигнала также уменьшается в 2 раза, а суммарные энергетические потери будут составлять не более 6 дБ [3].

Однако в наземных РЛС, высота подъема антенны которых не превышает 0,5...2 м, использование указанных видов модуляции не позволяет существенно снизить требования к динамическому диапазону приемника РЛС. Это обусловлено тем, что уровень мощности сигнала, отраженного от участков земной поверхности и местных предметов, расположенных вблизи антенны, будет значительно превышать уровень сигнала, отраженного от удаленной цели.

Устранить указанный недостаток можно за счет временной задержки включения приемника РЛС относительно момента окончания излучения зондирующего сигнала в каждом цикле.

На рис. 1 приведены эпюры напряжений, поясняющие принцип работы РЛС, для случая трехэтапного просмотра дальности от R_{\min} до R_{\max} , где пунктирной линией показана зависимость коэффициента корреляции $K(\tau_c)$ модуляционной функции от времени задержки отраженного сигнала.

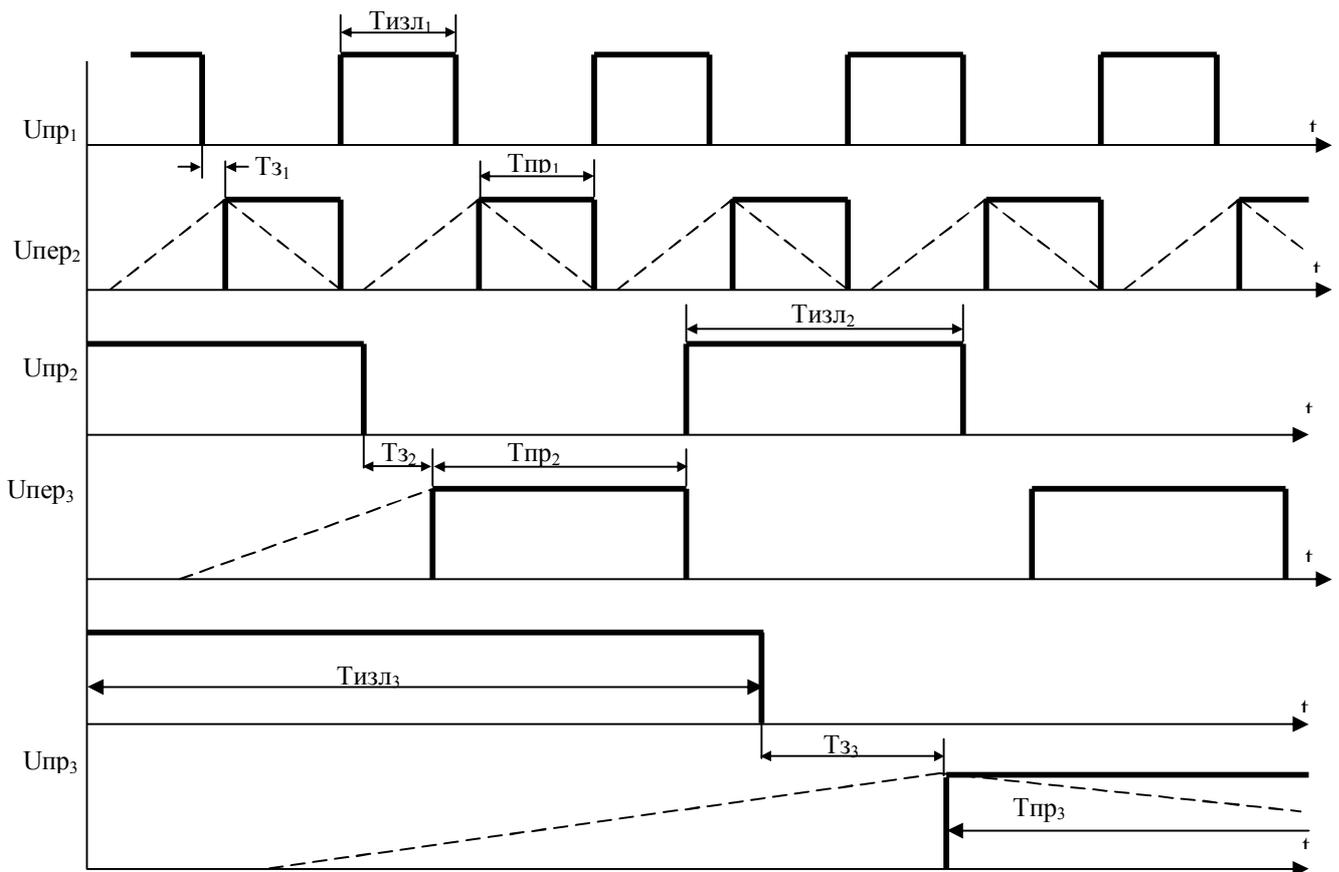


Рис. 1. Диаграммы излучения и приема зондирующего сигнала

Под коэффициентом корреляции $K(\tau_c)$ в данном случае понимается корреляция между огибающими отраженного сигнала на входе приемника ШРЛС и импульсами коммутации, открывающими его.

Из рис. 1 видно, что период модуляции зондирующего сигнала T_{Π} включает в себя время излучения $T_{\text{изл}}$, время задержки приема сигнала относительно момента окончания излучения T_3 и время приема отраженного сигнала $T_{\text{пр}}$, то есть $T_{\Pi} = T_{\text{изл}} + T_3 + T_{\text{пр}}$.

Полагая, что $T_{\text{пр}} = T_{\text{изл}}$, скважность зондирующего сигнала можно определить из выражения

$$Q = \alpha + 2, \quad (1)$$

где Q - скважность зондирующего сигнала;

α - коэффициент задержки начала приема сигналов относительно момента окончания излучения ($\alpha = T_3 / T_{\text{изл}}$).

Величину мертвой зоны в этом случае можно рассчитать по формуле

$$R_{\min} = \alpha \frac{cT_{\text{изл}}}{2}$$

Необходимо отметить, что квазинепрерывному режиму излучения присущи энергетические потери, величина которых, по сравнению со случаем использования непрерывного сигнала, может быть определена по формуле

$$П(\text{дБ}) = 10 \lg \frac{1}{\alpha + 2}. \quad (2)$$

Для оценки уменьшения динамического диапазона отраженных сигналов при изменении дальности от R_{\min} до R_{\max} воспользуемся уравнением дальности действия РЛС, введя в него коэффициент корреляции $K(\tau)$, который характеризует изменение мощности отраженного сигнала на входе устройства обработки ШРЛС от времени его задержки τ . После подстановки имеем

$$P_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{изл}} G^2 \lambda^2 \sigma K(\tau)}{(4\pi)^3 R^4}, \quad (3)$$

где $P_{\text{изл}}$ - мощность зондирующего сигнала;

G - коэффициент направленного действия антенны ШРЛС;

λ - рабочая длина волны;

R - дальность до цели;

σ - эффективная поверхность рассеяния цели.

Используя приведенные на рисунке 1 данные, выражение для коэффициента корреляции $K(\tau)$ можно представить в следующем виде:

$$K(\tau) = \begin{cases} \frac{\tau}{T_{\text{изл}}} - \alpha & \text{при } \alpha < \frac{\tau}{T_{\text{изл}}} \leq \alpha + 1 \\ \alpha + 2 - \frac{\tau}{T_{\text{изл}}} & \text{при } \alpha + 1 < \frac{\tau}{T_{\text{изл}}} \leq \alpha + 2 \end{cases} \quad (4)$$

При этом временной интервал, в котором находятся возможные для приема отраженного сигнала времена его задержки, будет равен

$$\alpha T_{\text{изл}} < \tau < (\alpha + 2) T_{\text{изл}}. \quad (5) \quad (3.60)$$

Выразив дальность до цели через τ и подставив выражение (4) в выражение (3), получим

$$P_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{изл}} G^2 \lambda^2 \sigma \left(\frac{\tau}{T_{\text{изл}}} - \alpha \right)}{(4\pi)^3 \left(\frac{c\tau}{2} \right)^4}.$$

После алгебраических преобразований получим

$$P_{ex} = A \frac{\beta - \alpha}{\beta^4}, \quad (6)$$

где

$$\beta = \frac{\tau}{T_{изл}}, \quad A = \frac{P_{изл} G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3} \left(\frac{2}{cT_{изл}} \right)^4.$$

При $A = \text{const}$ максимальное значение $P_{вх\max}$ будет иметь место, когда $\beta = 0,75\alpha$. При этом

Так, например, при $\alpha = 0,1$ и $\beta = 0,1001$, что соответствует случаю, когда имеем

$$P_{ex\max} = A \frac{1}{9,48\alpha^3}.$$

$$0,1001 < \tau/T_{изл} \leq 1,1001$$

$$P_{ex\min} = 0,996A \quad \text{и} \quad P_{ex\max} = A \frac{10^3}{9,48\alpha^3}.$$

Тогда динамический диапазон отраженного сигнала при изменении дальности до цели от R_{\min} до R_{\max} составит

$$\frac{P_{ex\max}}{P_{ex\min}} = \frac{10^3}{9,48 \cdot 0,996} = 105,9 \quad (20,25 \text{ дБ}).$$

Графики зависимости $\frac{P_{ex}}{P_{ex\max}} = f\left(\frac{\tau}{T_{изл}}\right)$ для различных значений α приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что при фиксированном диапазоне времени задержки обрабатываемого входного сигнала $\Delta\tau = \text{const}$ его динамический диапазон существенно зависит от α , а при $T_{изл} = \text{const}$ от $\Delta\tau$.

Так при $\Delta\tau = T_{изл}$ и $\alpha = 0,1$ динамический диапазон сигнала будет равен ~ 22 дБ, а при $\alpha = 1 - 3$ дБ.

Увеличение $\Delta\tau$ приводит к возрастанию динамического диапазона. Для случая, когда $\Delta\tau = 1,5 T_{изл}$, динамический диапазон входного сигнала составит: 31,2 дБ – для $\alpha = 0,1$ и 9,4 дБ – для $\alpha = 1$.

Нетрудно показать, что при $\Delta\tau = T_{изл}$ отношение R_{\max} к R_{\min} равно

$$\frac{R_{\max}}{R_{\min}} = \frac{\alpha + 1}{\alpha}, \quad (7)$$

а при $\Delta\tau = 1,5 T_{изл}$

$$\frac{R_{\max}}{R_{\min}} = \frac{\alpha + 1,5}{\alpha}. \quad (8)$$

Таким образом, изменяя в ШРЛС один из параметров излучения, например α , представляется возможным существенно уменьшить динамический диапазон входных сигналов и изменять величину участка одновременно просматриваемой дальности R_{\max}/R_{\min} .

Как указывалось выше, при амплитудной модуляции зондирующего сигнала, частота его повторения $F_{п}$ должна быть больше, чем максимально измеряемая с помощью РЛС доплеровская частота $f_{d\max}$. При $T_{пр} = T_{изл}$ выражение для $F_{п}$ можно представить в виде

$$F_{п} = \frac{1}{T_{изл}(\alpha + 2)}. \quad (9)$$

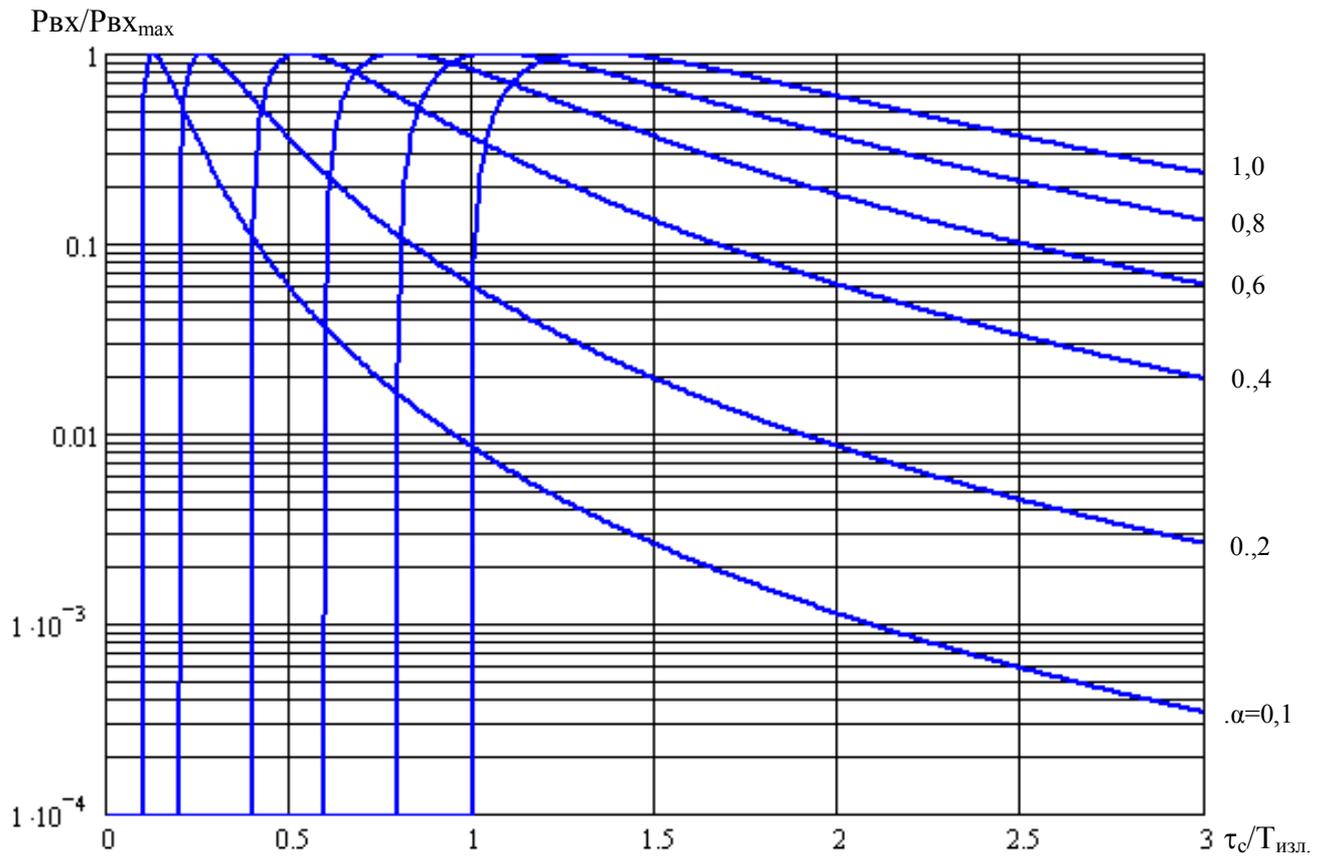


Рис. 2. Зависимость мощности сигнала на входе приемника после коммутации входа от относительного времени задержки.

Подставляя выражение для $T_{изл}$ в (9), получим

$$F_{n\min} = \frac{\alpha + 1}{(\alpha + 2)\tau_{\max}} = \frac{(\alpha + 1)c}{(\alpha + 2)2R_{\max}}. \quad (10)$$

При $\tau_{\max} = T_{изл}(\alpha + 1)$ имеем

$$F_{n\min} = \frac{(\alpha + 1,5)c}{(\alpha + 2)2R_{\max}}. \quad (11)$$

В таблице 1 приведены некоторые, рассчитанные по формулам (1)...(11), характеристики ШРЛС в зависимости от α .

Из таблицы видно, что использование квазинепрерывного режима позволяет уменьшить динамический диапазон принимаемых сигналов до уровня ~ 3 дБ (при $\alpha=1$). При этом энергетические потери по сравнению с непрерывным режимом не будут превышать 5 дБ. Для оценки возможности использования такого режима работы в ШРЛС РНДЦ сравним значения максимально измеряемых в них доплеровских частот fd_{\max} с частотой повторения зондирующего сигнала. При максимальной скорости движения цели $V_r = 60$ км/час значения доплеровских частот составят 1,1 кГц, 1,67 кГц, 4,17 кГц и 11,1 кГц соответственно для рабочих длин волн λ равных 3 см, 2 см, 8 мм и 3 мм.

Характеристики ШРЛС с квазинепрерывным режимом работы
в зависимости от α

α	0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1
Q	2	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	3
Π , дБ	3	3,22	3,42	3,8	3,97	4,14	4,47	4,77
R_{max}/R_{min}	-	11	6	3,5	3	2,66	2,25	2
$P_{вх_{max}}/P_{вх_{min}}$, дБ ($\Delta\tau_c = T_{изл}$)	-	22	14	7,8	5,9	5	4,22	3
$P_{вх_{max}}/P_{вх_{min}}$, дБ ($\Delta\tau_c = 1,5 \cdot T_{изл}$)	-	31,2	23	16	14	13	10,8	3,4
F_n , кГц $R_{max}=10$ км	7,5	7,85	8,18	8,74	9	9,24	9,64	10
F_n , кГц $R_{max}=20$ км	3,75		4,09	4,37	4,5	4,62	4,82	5
R_{min} , км $R_{max}=10$ км	-	0,09	1,7	2,9	3,3	3,8	4,4	5

При этом при $\Delta\tau = T_{изл}$, $\alpha = 0,5$ и $F_n = f_{dmax}$ максимальная дальность действия ШРЛС соответственно будут составлять 82 км, 54 км, 22 км и 8,1 км, что вполне приемлемо для РЛС РНДЦ, работающих в указанных диапазонах радиоволн.

Таким образом, рассмотренный режим модуляции излучаемого и принимаемого сигналов обеспечивает регулируемую мертвую зону ШРЛС и позволяет в значительной степени уменьшить влияние помеховых сигналов, обусловленных просачиванием зондирующего сигнала в приемный канал, снизить уровень отражений от участков земной поверхности и местных предметов, расположенных вблизи антенны, а также существенно уменьшить динамический диапазон отраженных сигналов при изменении дальности от R_{max} до R_{min} . Снижение мешающего влияния указанных сигналов позволяет, в конечном счете, реализовать потенциальные возможности ШРЛС по дальности действия и обеспечивает работу на одну антенну.

Кроме того, возможность изменения мощности зондирующего сигнала при переходе с одного поддиапазона дальности на другой и соответствующая регламентация времени работы по мощности излучения позволяет повысить скрытность работы ШРЛС. При этом дальность разведки наземных движущихся целей при $V_{max} = 60$ км/час может составлять в РЛС 3 мм диапазона - 8 км, 8 мм диапазона - 22 км, 3 см диапазона 90 км.

Литература

1. Poirier J.L. Quasi monochromatic scattering and some possible radar application/ Radio Science? 1968, v.3, № 9.
2. Радиолокационные сигналы с низкой вероятностью их перехвата. «Технические средства разведки капиталистических государств», ВИНТИ, вып. 2, 1984, с 39.
3. Вопросы скрытности и помехоустойчивости при применении в радиолокации сложных псевдошумовых сигналов. Под общей ред. Винокурова В.И., изд-во МО СССР, 1977.