

# Эффективность использования энергии зондирующих импульсов в сверхширокополосной локации

И.Я.Иммореев, Л.И.Телятников

Рассмотрены особенности энергетики сверхширокополосных (СШП) локоаторов, работающих импульсами без высокочастотного заполнения (видеоимпульсами); выявлены причины потерь энергии, присущих только этому типу локоатора, и предложены способы их устранения; определены границы применения предложенных способов.

**Постановка задачи.** Сверхширокополосными называются сигналы, у которых по определению, приведенному в [1], относительная полоса частот  $\Delta F = (f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min})$  близка к единице. Радиосистемы, использующие такие сигналы, существенно отличаются от традиционных, узкополосных систем (имеющих  $\Delta F \approx 0,01$  или меньше) как методами расчета, так и своей технической реализацией. Форма СШП сигналов обычно существенно отличается от гармонического колебания [2]. В дальнейшем будем использовать другое обозначение относительной полосы частот  $\Delta f = f_{\max} / f_{\min}$ , связанное с  $\Delta F$  выражением  $\Delta f = (1 + \Delta F) / (1 - \Delta F)$ .

В СШП локации в качестве зондирующих импульсов, позволяющих реализовать сверхширокую полосу, рассматриваются два вида сигналов, имеющих длительность  $(1 \dots 5) \cdot 10^{-9}$  с: видеоимпульсы [1] и короткие отрезки синусоиды, состоящие из одного—двух периодов колебаний [3]. В статье обсуждается СШП локоатор, работающий короткими видеоимпульсами.

Одна из особенностей этого локоатора — дополнительные потери энергии излучаемого импульса, возникающие из-за использования сигнала такого вида. Дело в том, что любая антенна не излучает в области частот, лежащих ниже некоторой частоты  $f_{\min}$ . Амплитудно-частотная характеристика антенн в этой области проходит на уровне нуля. Можно сказать, что антенна по отношению к сигналу является, по существу, фильтром верхних частот.

С другой стороны, частотный спектр любого видеоимпульса имеет максимум именно на нулевой частоте. Основная энергия импульса сосредоточена между частотой  $f=0$  и некоторой частотой  $f_{\max}$ , лежащей обычно в области первого нуля его спектра. В результате частотная характеристика антенны и спектр сигнала оказываются несогласованными. Поэтому энергия импульса используется не полностью.

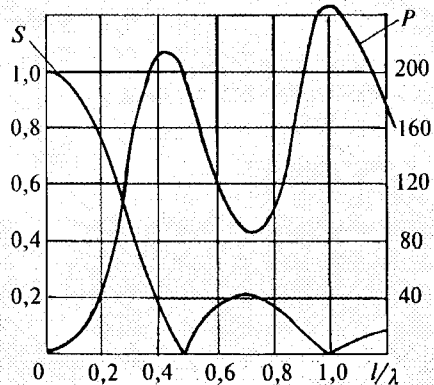


Рис.1

Часть энергии, не попавшей в полосу частот антенны, оказывается потерянной.

На рис. 1 в качестве примера приведена частотная характеристика симметричного вибратора  $P(l/\lambda)$ , на которую наложен спектр короткого видеоимпульса  $S(l/\lambda)$ , длительностью  $\tau_1 = 2l/c$ , где  $l$  — длина вибратора;  $c$  — скорость света.

Эти потери должны учитываться при оценке энергетических показателей СШП РЛС. Для этого введем понятие спектрального КПД  $\eta_{\Delta f}$ , который является составной частью общего КПД передающего устройства локоатора. Этот КПД определяет относительную долю энергии зондирующего импульса, попадающую в рабочую полосу частот антенны,

$$\eta_{\Delta f} = W_{\Delta f} / W_S, \quad (1)$$

где  $W_S$  — полная энергия импульса;  $W_{\Delta f}$  — энергия составляющих спектра, попадающих в полосу частот антенны.

Отметим, что для однополярных импульсов спектральные потери могут быть весьма существенными, поскольку неиспользованной оказывается наиболее интенсивная низкочастотная часть спектра. Поэтому очевидный путь повышения  $\eta_{\Delta f}$  заключает-

ся в соответствующей коррекции формы спектра зондирующего импульса. Например, из спектра  $S_1(f)$  основного однополярного зондирующего импульса  $u_1(t)$  можно вычесть более узкополосный спектр  $S_2(f)$  корректирующего импульса  $u_2(t)$  такой формы и интенсивности, чтобы в суммарном спектре

$$S_{\Sigma}(f) = S_1(f) - S_2(f) \quad (2)$$

низкочастотные составляющие для  $f < f_{\min}$  были бы значительно меньше, чем в основном спектре  $S_1(f)$ , а для  $f > f_{\min}$  изменения были бы не существенны. Этому будет соответствовать скорректированный биполярный зондирующий импульс

$$u_{\Sigma}(t) = u_1(t) - u_2(t). \quad (3)$$

Теперь наибольшее значение спектрального КПД будет зависеть не только от параметров основного импульса, но и от параметров корректирующего импульса. Кроме того, для каждой формы основного импульса  $u_1(t)$  при заданных границах полезной полосы частот  $f_{\min}$  и  $f_{\max}$  существует его оптимальная длительность  $\tau_{\text{opt}}$ , при которой спектральный КПД имеет наибольшее значение.

Цель статьи — получение наибольших значений спектрального КПД для некоторых простых форм основных и корректирующих зондирующих импульсов, применяемых в СШП РЛС.

Здесь не приведены аналитические выражения для хорошо известных форм видеопульсов и их спектров (см., например, [4]). Все числовые значения получены методом математического моделирования.

Спектральный КПД однополярных импульсов. Если  $S_1(f)$  — модуль спектральной плотности импульса  $u_1(t)$ , то с учетом связи энергии сигнала с модулем его спектральной плотности запишем (1) в виде

$$\eta_{\Delta f} = \left( 1/\pi \int_0^{f_{\max}} S_1^2(f) df - 1/\pi \int_0^{f_{\min}} S_1^2(f) df \right) / \left( 1/\pi \int_0^{\infty} S_1^2(f) df \right). \quad (4)$$

Поскольку ширина спектра импульса однозначно определяется его длительностью  $\tau_1$ , целесо-

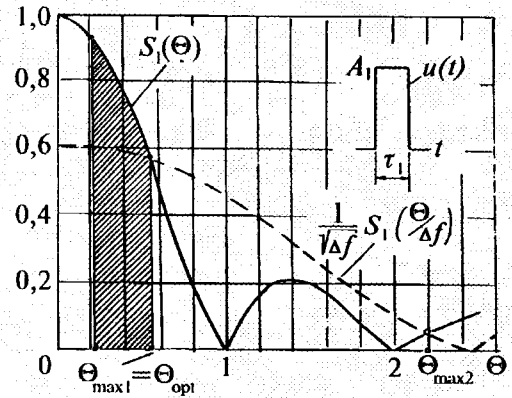


Рис.2

образно в (4) перейти к обобщенной безразмерной переменной  $\theta = f\tau_1$ , позволяющей представить частотные зависимости для  $S_1$ ,  $\eta_{\Delta f}$  и других параметров в обобщенном виде.

С учетом этого, после сокращений и замены переменных в (4) получим

$$\eta_{\Delta f} = \left( \int_0^{\theta_{\max}} S_1^2(\theta) d\theta - 1/\Delta f \int_0^{\theta_{\max}} S_1^2(\theta/\Delta f) d\theta \right) / \int_0^{\infty} S_1^2(\theta) d\theta, \quad (5)$$

где  $\theta_{\max} = f_{\max}\tau_1$ .

При определении наибольшего значения  $(\eta_{\Delta f})_{\max}$  полоса частот  $\Delta f$  в (5) может считаться заданной. Поэтому экстремум  $\eta_{\Delta f}$  будем искать по обобщенной переменной

$$d\eta_{\Delta f}(\theta_{\max})/d\theta_{\max} = S_1^2(\theta_{\max}) - 1/\Delta f \times S_1^2(\theta_{\max}/\Delta f) = 0. \quad (6)$$

Учитывая, что в рассматриваемом случае  $\theta > 0$ ,  $S_1(\theta) > 0$ , вместо (6) получим

$$S_1(\theta_{\max}) = 1/\sqrt{\Delta f} \times S_1(\theta_{\max}/\Delta f). \quad (7)$$

Корни этого уравнения и являются теми величинами  $\theta_{\max}$ , при которых  $\eta_{\Delta f}$  принимает экстремальные значения. Остается выделить наибольшее из них в области  $\theta_{\max} > 0$ .

В качестве примера на рис.2 показано в обобщенном виде графическое решение (7) для импульса прямоугольной формы при  $\Delta f = 2,5$ . Отмечены экстремальные значения  $\theta_{\max}$ . Из дальнейшего анализа (7) следует, что нечетные корни уравнения  $(\theta_{\max 1}, \theta_{\max 3}, \dots)$  соответствуют максимуму  $\eta_{\Delta f}$  чет-

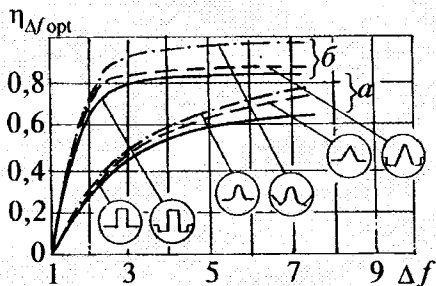


Рис.3

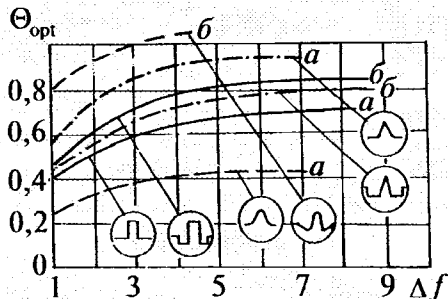


Рис.4

ные — минимуму, а первый корень ( $\theta_{\max 1} = \theta_{\text{opt}} = 0,46$ ) — наибольшему значению  $\eta_{\Delta f \text{opt}}$ . Вычисленное по (5) значение  $\eta_{\Delta f \text{opt}} = 0,45$ . На рис.2 штриховкой отмечена область спектра, попавшая в этом, оптимальном, случае в рабочую полосу частот.

На рис.3 (кривые *a*) приведены зависимости  $\eta_{\Delta f \text{opt}}$  от  $\Delta f = f_{\max} / f_{\min}$ , рассчитанные указанным выше путем, для трех простых однополярных импульсов: прямоугольного, колоколообразного, треугольного.

Для тех же импульсов на рис.4 (кривые *a*) показаны зависимости  $\theta_{\text{opt}}$  от  $\Delta f$ , а на рис.5 (кривые *a*) — зависимость  $\eta_{\Delta f \text{opt}}$  от  $\theta_{\max}$  для  $\Delta f = 3$ , дающие представление о характере зависимости  $\eta_{\Delta f}$  от длительности импульса  $\tau_1$  при заданном  $f_{\max}$  (или наоборот).

Отметим, что для всех рассмотренных импульсов при  $\Delta f = 3$  наибольший КПД  $\eta_{\Delta f \text{max}} < 50\%$ , а оптимальное значение  $\theta_{\text{opt}} < 1$ , т. е. длительность импульсов при заданной  $f_{\max}$  для лучшего использования энергии зондирующего импульса должна быть меньше, чем  $1/f_{\max}$ .

Спектральный КПД скорректированных импульсов. Определим возможные наибольшие значения спектрального КПД  $\eta_{\Delta f \text{opt}}$  для простейших скорректированных импульсов, которые можно представить разностью двух однополярных импульсов, каждый

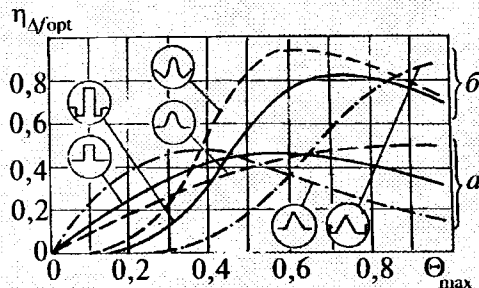


Рис.5

из которых имеет одну из рассматриваемых выше простых форм — прямоугольную, колоколообразную или треугольную.

Амплитуду и длительность корректирующего импульса  $u_2(t)$  удобно выразить через соответствующие параметры основного импульса:  $A_2 = \alpha A_1$ ;  $\tau_2 = \beta \tau_1$ . Тогда основное соотношение (5) для  $\eta_{\Delta f}$  будет обобщенным по параметрам  $\alpha, \beta$  скорректированного импульса.

На рис.6 представлен скорректированный импульс, сформированный из основного и корректирующего импульсов прямоугольной формы. Там же изображен и его спектр для  $\alpha = 0,4$  и  $\beta = 3$ . Так же как и на спектре, изображенном на рис.2, здесь для случая  $\Delta f = 3$  отмечены экстремальные значения параметра  $\theta_{\max}$  и выбранное из них оптимальное значение  $\theta_{\max \text{opt}} = 0,71$ . При этом определенное из (5) наибольшее значение  $\eta_{\Delta f \text{max}} = 0,8$ .

На рис.7 показана зависимость наибольших значений  $\eta_{\Delta f \text{opt}}$  от параметров  $\alpha, \beta$  для  $\Delta f = 3$ . Из этой зависимости следует, что параметры  $\alpha = 0,4, \beta = 3$  и  $\theta_{\max \text{opt}} = 0,71$  являются оптимальными для рассматриваемого скорректированного импульса.

Аналогичные зависимости  $\eta_{\Delta f \text{opt}}$  от  $\Delta f$  и  $\theta_{\max}$ , а

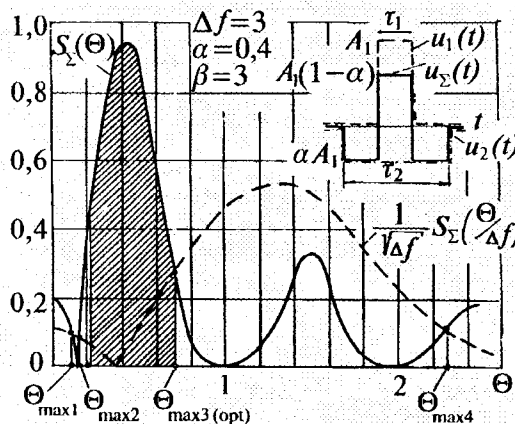


Рис.6

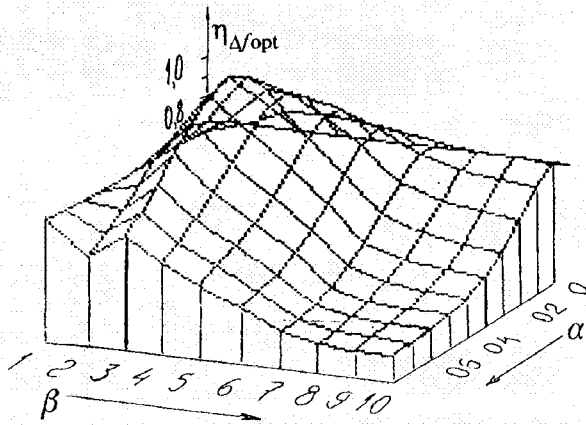


Рис.7

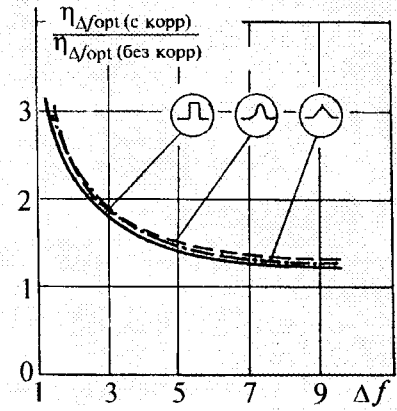


Рис.8

также  $\theta_{opt}$  от  $\Delta f$  рассчитаны для некоторых других сочетаний форм основного и корректирующего импульсов (см. кривые *б* на рис. 3, 4, 5).

На рис. 8 приведены зависимости отношения наибольших спектральных КПД импульсов с коррекцией и без  $\sigma = \eta_{\Delta f, opt} (с\ корр) / \eta_{\Delta f, opt} (без\ корр)$  от отношения верхней и нижней частот спектра сигнала  $\Delta f$ . Эти зависимости позволяют оценить эффективность процедуры коррекции формы импульса для повышения спектрального КПД. С ростом величины  $\Delta f$  коррекция формы импульса становится все менее эффективной, уменьшаясь с 2 при  $\Delta f=3$  до 1,2 при  $\Delta f \approx 10$ .

В таблице даны наибольшие значения  $\eta_{\Delta f, opt}$  и соответствующие им оптимальные значения параметров корректирующих импульсов  $\alpha_{opt}$ ,  $\beta_{opt}$ ,  $\theta_{opt}$  для разных сочетаний форм основных и корректирующих импульсов при  $\Delta f=3$ .

Из сравнения полученных величин с аналогичными величинами для однополярных импульсов

следует, что за счет коррекции формы импульса спектральный КПД может быть существенно повышен, однако эффективность повышения тем значительнее, чем меньше величина  $\Delta f$ .

В общем случае корректирующий импульс  $u_2(t)$  может быть смещен относительно основного импульса на время  $t_0$ . Тогда вместо (3) можно записать

$$u_{\Sigma}(t) = u_1(t) - u_2(t - t_0) \quad (8)$$

и для суммарного спектра вместо (2) получим

$$S_{\Sigma}(f) = [S_1^2(f) - 2S_1(f)S_2(f)\cos 2\pi f t_0 + S_2^2(f)]^{1/2}. \quad (9)$$

На рис. 9 показаны зависимости наибольшего спектрального КПД  $\eta_{\Delta f, opt}$  от относительного запаздывания  $\gamma = t_0/t_1$  корректирующих импульсов различной формы от основного прямоугольного импульса при  $\Delta f=3$ . Кривые *а* отражают зависимость

Форма корректирующего импульса	Значения параметров корректирующего импульса для разных форм основного импульса $u_1(t)$								
	Прямоугольный			Колоколообразный			Треугольный		
	$\eta_{\Delta f, opt}$	$\theta_{opt}$	$\alpha_{opt}/\beta_{opt}$	$\eta_{\Delta f, opt}$	$\theta_{opt}$	$\alpha_{opt}/\beta_{opt}$	$\eta_{\Delta f, opt}$	$\theta_{opt}$	$\alpha_{opt}/\beta_{opt}$
Без коррекции	0,45	0,6	0	0,46	0,04	0	0,48	0,8	0
Прямоугольная	0,8	0,71	0,4 3	0,89	0,5	0,3 4	0,89	1,0	0,2 2
Колоколообразная	0,69	0,7	0,4 2	0,86	0,6	0,5 2	0,74	0,9	0,2 2
Треугольная	0,71	0,7	0,5 4	0,91	0,6	0,7 4	0,86	1,0	0,4 3

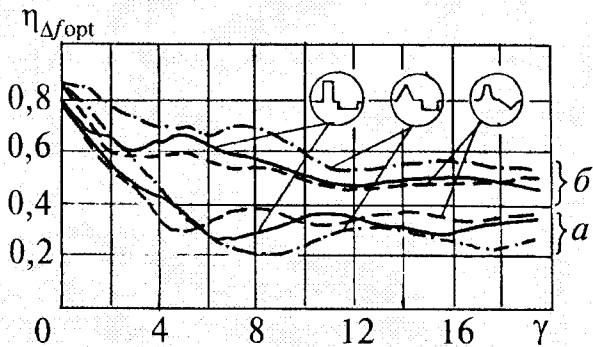


Рис.9

$\eta_{\Delta f_{opt}}$  от запаздывания  $\gamma$  при постоянных параметрах  $\alpha, \beta$  и  $\theta$ , оптимальных для  $\gamma=0$ ; кривые б отражают ту же зависимость для случая, когда для каждого значения  $\gamma$  находились оптимальные параметры  $\alpha, \beta$  и  $\theta$ .

В обоих случаях при  $\gamma \gg 1$  значение  $\eta_{\Delta f}$  стремится к наибольшему значению основного импульса. Осцилляции при  $\gamma > 3$  определяются вторым членом в (9). По этой же причине фактически исчезает зависимость  $\eta_{\Delta f}$  от формы корректирующего импульса.

Для практической реализации большой интерес будут представлять скорректированные импульсы, у которых основной и корректирующие импульсы не перекрываются по времени, т. е. когда  $t_0 > (t_1/2 + t_2/2)$ , а  $\gamma > 1/2(1 + \beta)$ . Для случая, представленного на рис.9 это соответствует условию  $\gamma > 1,5$ . Отметим, что в этом случае при  $\gamma = 1,5$  (импульсы следуют друг за другом)  $\eta_{\Delta f_{opt}}$  уменьшается по сравнению с наибольшей величиной при  $\gamma = 0$ , но остается более высоким, чем у некорректированного импульса.

● При выборе формы зондирующих импульсов видеоимпульсного СШП локатора необходимо учитывать спектральный КПД, как один из важных энергетических параметров.

Спектральный КПД однополярных импульсов может быть существенно меньше единицы. Особенно это относится к импульсам, имеющим отношение верхней частоты спектра к нижней  $\Delta f < 3$ . Коэффициент полезного действия таких импульсов не превышает 50%. С увеличением  $\Delta f$  спектральный КПД

растет и при  $\Delta f \approx 10$  достигает (85...90)%. Поэтому при  $\Delta f < 3$  целесообразно использовать коррекцию зондирующих импульсов, позволяющую получить более высокие значения спектрального КПД. Коррекция формы импульса даст возможность повысить спектральный КПД при  $\Delta f \leq 3$  в 2 раза, а при  $\Delta f \approx 10$  — в 1,2 раза. Очевидно, идеальным был бы импульс вида  $u_{\Sigma}(t) = \text{sinc}(2\pi f_{\max} t) - \text{sinc}(2\pi f_{\min} t)$ , для которого спектральный КПД равен единице. Однако практическая реализация такого импульса вряд ли возможна.

В простейшем случае, когда скорректированный импульс представляет разность двух однополярных импульсов, основного и корректирующего, КПД при  $\Delta f = 3$  может быть повышен до 80...90%. В более интересном для практики случае, когда корректирующий импульс не перекрывается с основным, а следует сразу за ним, КПД может сохранить указанные выше значения, хотя это потребует оптимизации параметров корректирующего импульса.

Оптимальные значения обобщенного параметра  $\theta_{opt} = (f_{\max} \tau_1)_{opt}$  для импульсов с коррекцией возрастают по сравнению с аналогичными значениями для однополярного импульса в 1,5...2 раза. Соответственно, оптимальная длительность основного импульса будет  $\tau_{1opt} = (0,5...0,9)/f_{\max}$ . Оптимальные параметры корректирующего импульса лежат в пределах  $\alpha = (0,3...0,4); \beta = (2...4)$ .

Отметим, что оптимумы КПД “тупые” (см. рис.5 и 6) и при отклонении от оптимальных значений параметров на 5...10% КПД существенно не изменяется.

### Литература

1. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1985.
2. Иммореев И.Я. Сверхширокополосная (СШП) локация: основные особенности и отличия от традиционной радиолокации. — Электромагнитные волны и электронные системы, 1997, т.2, №1.
3. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. — М.: Радио и связь, 1989.
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Радио и связь, 1986.

Поступила 10 июня 1997 г.