

УДК 621.391.253

Применение сложных сигналов в командно-телеметрических радиоприемниках

Ю. В. Стасев¹, И. Д. Горбенко², Б. И. Макаренко³,
А. В. Ивашкин¹, Д. Н. Воронов¹

¹Харківський військовий університет, Харків

²Харківський технічний університет радіоелектроніки, Харків

³Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

Надійшла до редакції 07.03.97

Розглядаються алгоритми побудови та досліджуються властивості складних сигналів. Аналізується захищеність від збурень та імітостійкість командно-телеметричних радіоліній з різними системами складних сигналів.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации систем управления космическими аппаратами показал (Тузов и др., 1993) что качество управления в существенной мере зависит от решения проблемы помехозащищенности и имитостойкости командно-телеметрической радиоприемной линии. Решение этих проблем в определенной мере зависит от ансамблевых, структурных и корреляционных свойств используемых сложных сигналов.

К настоящему времени в командно-телеметрических радиоприемниках широкое применение нашли сложные широкополосные сигналы, построенные на основе линейных рекуррентных последовательностей максимального периода (ЛРПМ) (Тузов и др., 1993; Горбенко и др., 1996; Spilker, 1978; Варакин, 1985). Выбор этого класса сложных сигналов обусловлен простотой реализации устройств формирования ЛРПМ, а также хорошими периодическими автокорреляционными свойствами. Вместе с тем ЛРПМ обладают неудовлетворительными ансамблевыми, структурными и взаимокорреляционными свойствами, что снижает имитостойкость и помехозащищенность командно-телеметрических радиоприемных линий. Кроме того, ЛРПМ могут быть построены

только для длительностей $L = 2^m - 1$, где m — степень образующего полинома, и являются неоптимальными по апериодическим корреляционным функциям.

Развитие микропроцессорной техники и ее широкое использование в устройствах формирования и обработки сложных сигналов позволяет применять в командно-телеметрических радиоприемниках сигналы с более сложными, нелинейными законами формирования, свободными от указанных недостатков. Особый интерес среди нелинейных систем сигналов проявлен к характеристическим и производным ортогональным последовательностям.

Характеристические последовательности, обладая примерно такими же автокорреляционными свойствами, как и ЛРПМ (уровень боковых выбросов периодической функции автокорреляции (ПФАК) $R = \pm 2$ при $L \equiv 2 \pmod{4}$ и $R = \{0; 4\}$ при $L \equiv 0 \pmod{4}$), имеют значительно лучшие ансамблевые и структурные свойства и могут быть построены для длительностей $L = p^m - 1$, где p — простое число.

Производные ортогональные последовательности, построенные на основе характеристических последовательностей, включают в себя последние и обла-

дают значительно лучшими ансамблевыми и структурными свойствами.

Ниже анализируются свойства этих систем сигналов и обосновываются характеристики командно-телеметрической радиоприемной по имитостойкости и помехозащищенности.

АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

Линейные рекуррентные последовательности максимального периода можно генерировать с помощью регистра с обратными связями, символы на выходе которого a_i удовлетворяют уравнению (Варакин, 1985)

$$a_i = \sum_{j=1}^m c_j a_{i-m+j}, \tag{1}$$

где $i - m + j > 0$; c_j — коэффициенты неприводимого примитивного полинома степени m .

Алгоритм формирования характеристических последовательностей базируется на понятии двузначного характера $\varphi(x)$ мультипликативной группы поля Галуа $GF(p^m)$. Правило формирования характеристической последовательности можно представить в виде (Горбенко, 1989)

$$a_i = \begin{cases} \varphi(\theta^i + 1), & \text{если } \theta^i + 1 \not\equiv 0 \pmod{p}, \\ 1, & \text{если } \theta^i + 1 \equiv 0 \pmod{p}, \end{cases} \tag{2}$$

где θ — первообразный элемент поля $GF(p^m)$.

Производные ортогональные последовательности строятся на основе алгоритма поэлементного умножения ортогональной системы сигналов \mathbf{H} на производящий сигнал \mathbf{W} (Стасев, Пастухов, 1996):

$$|\mathbf{A}| = \begin{vmatrix} h_{11}w_1 & h_{12}w_2 & \dots & h_{1m}w_m \\ h_{21}w_1 & h_{22}w_2 & \dots & h_{2m}w_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1}w_1 & h_{m2}w_2 & \dots & h_{mm}w_m \end{vmatrix}. \tag{3}$$

Здесь h_{ij} — элемент задающего ортогонального сигнала из ансамбля \mathbf{H} ; w_i — элемент производящего сигнала \mathbf{W} .

АНАЛИЗ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ КОМАНДНО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛИНИИ СО СЛОЖНЫМИ СИГНАЛАМИ

При оценке помехозащищенности командно-телеметрической радиоприемной необходимо рассматривать два режима работы: режим обнаружения (синхронизации) и режим различения сложных сигналов.

Режим обнаружения сложных сигналов характеризуется вероятностью ложной тревоги $P_{лт}$ и вероятностью пропуска сигнала $P_{пр}$.

Полагая, что число интервалов неопределенности при поиске равно N , запишем выражение, связывающее вероятности $P_{лт}$ и $P_{пр}$ с энергетическими характеристиками сигнала (Пестряков, 1973):

$$P_{пр} = \varnothing \left[\sqrt{\frac{E_c}{N_0}} - \sqrt{2 \ln \frac{N}{P_{лт}}} \right], \tag{4}$$

где

$$\varnothing(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x \exp(-t^2) dt,$$

E_c/N_0 — отношение энергии сигнала к спектральной мощности помехи. Выражение (4) учитывает случай, когда фаза сигнала точно известна. Очевидно, что при наличии неопределенностей по фазе достоверность обнаружения ухудшается, что можно рассматривать как потери энергии сигнала. В работе Пестрякова (1973) показано, что для сигнала со случайной фазой требуемое отношение E_c/N_0 при заданных $P_{лт}$ и $P_{пр}$ определяются выражением

$$\frac{E_c}{N_0} = \left[\sqrt{\ln \frac{N}{P_{лт}}} + \sqrt{\ln \frac{1}{P_{пр}} - 1.4} \right]^2. \tag{5}$$

В режиме различения сложных сигналов качество различения сигналов характеризуется вероятностью ошибки $P_{ош}$ и определяется соотношением (Варакин, 1985)

$$P_{ош} = 1 - \varnothing \left[\sqrt{\frac{2E_c}{N_0}} \right] \tag{6}$$

при когерентной обработке сигнала и

$$P_{ош} = 0.5 \exp[-E_c / (2N_0)] \tag{7}$$

при некогерентной обработке сигнала.

Выражения (4)–(7) позволяют оценить помехозащищенность командно-телеметрической радиоприемной при воздействии заградительных и сосредоточенных по спектру помех. В то же время анализ особенностей функционирования командно-телеметрических радиоприемных показывает, что наряду с заградительными и сосредоточенными по спектру помехами на радиоприемную могут воздействовать мощные структурные помехи. В этом случае помехозащищенность командно-телеметрической радиоприемной зависит от взаимной корреляции полезного и мешающих сигналов.

При оценке помехозащищенности командно-телеметрической радиоприемной в условиях воздействия мощной структурной помехи воспользуемся выражением, связывающим вероятности $P_{лт}$ и $P_{пр}$ с

вероятностью ложной тревоги $P_{\text{лто}}$ и вероятностью правильного обнаружения $P_{\text{поо}}$ в одном интервале неопределенности (Варакин, 1985):

$$\begin{aligned} P_{\text{лт}} &= 1 - (1 - P_{\text{лто}})^L, \\ P_{\text{по}} &= 1 - (1 - P_{\text{лто}})^{L-1}(1 - P_{\text{поо}}). \end{aligned} \quad (8)$$

Вероятность ложной тревоги на интервале неопределенности согласно работе Варакина и Власова (1983) определяется выражением

$$P_{\text{лто}} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(B)}{\Gamma(B-0.5)} Q\left(r_0 \sqrt{\frac{B_2}{B_0}}\right), \quad (9)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция; $B = 0.5B_2$, $Q(x)$ — функция, определяемая как

$$Q(x) = \int (B_0 + B_2 t^2)^{-r} dt. \quad (10)$$

Эта функция выражается через элементарные функции при целых значениях B (Варакин, Власов, 1983):

$$\begin{aligned} Q(x) &= \\ &= \frac{x}{2L-1} \sum_{k=1}^{B-1} \frac{(2B-1)(2B-3)\dots(2B-2k+1)}{(B-1)(B-2)\dots(B-k)(1+x^2)^{n-k}} + \\ &\quad + \frac{(2n-3)!!}{2^{n-1}(n-1)} \operatorname{arctg}x. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь n — номер учитываемого момента распределения уровней боковых лепестков функции корреляции сигналов

$$r_0 = \mathbf{H}\sqrt{L}/U_{\text{п}}, \quad U_{\text{п}} = k\sqrt{P_{\text{п}}},$$

k — коэффициент пропорциональности, \mathbf{H} — величина порога порогового устройства; $P_{\text{п}}$ — мощность помехи;

$$B_0 = 2\mu_4 / (5\mu_4 - 9) = 2(\gamma + 3) / (5\gamma + 6), \quad (12)$$

$$B_2 = (\mu_4 - 3) / (5\mu_4 - 9) = \gamma / (5\gamma + 6); \quad (13)$$

μ_4, γ — четвертый момент и коэффициент эксцесса распределения уровней боковых лепестков функ-

ции корреляции сигналов. Подставляя (9) в (8), получим выражение для вероятности ложной тревоги при действии на обнаружитель структурной помехи. Используя это выражение и исходя из заданной вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$, определим величину нормированного порога R_0 .

В работе Варакина и Власова (1983) получена зависимость отношения мощностей полезного и мешающего сигналов, необходимого для достижения заданных характеристик устройства различения сигналов от коэффициента эксцесса распределения уровня лепестков функции корреляции.

Выражение для вычисления вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ имеет вид (Стасев, Пастухов, 1996)

$$P_{\text{ош}} \leq 1 - \frac{\Gamma(B)}{\sqrt{\pi} \Gamma(B-0.5)} \sigma \left(\frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{B_2 P_c}{B_0 P_{\text{п}}}} \right), \quad (14)$$

где σ — среднее квадратичное отклонение распределения уровней боковых лепестков функции корреляции.

Анализ выражений показывает, что качественные характеристики командно-телеметрической радиолнии зависят от статистических характеристик периодических функций взаимной корреляции (ПФВК) сигналов.

Статистические характеристики ПФВК:

- математическое ожидание выбросов M ;
- среднее квадратичное отклонение математического ожидания выбросов $\sqrt{D_M}$;
- дисперсия уровня выбросов D ;
- среднее квадратичное отклонение дисперсии выбросов $\sqrt{D_D}$;
- среднее значение максимального выброса $U_{\text{макс}}$
- и среднее квадратичное отклонение максимального выброса $\sqrt{D_{U_{\text{макс}}}}$

— оценивались по методике, приведенной в работе Варакина (1985).

В табл. 1—3 приведены результаты исследований статистических характеристик ПФВК ЛРПМ, характеристических последовательностей, производных ортогональных последовательностей. В послед-

Таблица 1. Статистические характеристики ПФВК ЛРПМ

Параметры ПФВК	Число элементов в сигнале					Усредненные значения
	15	63	255	511	1023	
M	0.24	$0.85 \cdot 10^{-1}$	$0.46 \cdot 10^{-1}$	$0.32 \cdot 10^{-1}$	$0.93 \cdot 10^{-2}$	$0.33/\sqrt{L}$
$\sqrt{D_M}$	$0.5 \cdot 10^{-1}$	$0.94 \cdot 10^{-1}$	$0.2 \cdot 10^{-1}$	$0.63 \cdot 10^{-2}$	$0.54 \cdot 10^{-2}$	$0.38 \cdot 10^{-1}$
D	$0.21 \cdot 10^{-1}$	$0.91 \cdot 10^{-2}$	$0.17 \cdot 10^{-2}$	$0.93 \cdot 10^{-3}$	$0.67 \cdot 10^{-3}$	$0.06/\sqrt{L}$
$\sqrt{D_D}$	0.3	$0.31 \cdot 10^{-1}$	$0.14 \cdot 10^{-1}$	$0.7 \cdot 10^{-2}$	$0.8 \cdot 10^{-2}$	$0.57 \cdot 10^{-1}$
$U_{\text{макс}}$	$2.9/\sqrt{L}$	$2.5/\sqrt{L}$	$2.9/\sqrt{L}$	$3.1/\sqrt{L}$	$3.1/\sqrt{L}$	$3/\sqrt{L}$
$\sqrt{D_{U_{\text{макс}}}}$	$0.51 \cdot 10^{-1}$	$0.6 \cdot 10^{-1}$	$0.63 \cdot 10^{-1}$	$0.55 \cdot 10^{-2}$	$0.53 \cdot 10^{-2}$	$0.17 \cdot 10^{-1}$

Таблица 2. Статистические характеристики ПФВК характеристических последовательностей

Параметры ПФВК	Число элементов в сигнале					Усредненные значения
	16	60	256	508	1020	
M	0.21	$0.82 \cdot 10^{-1}$	$0.51 \cdot 10^{-1}$	$0.34 \cdot 10^{-1}$	$0.89 \cdot 10^{-2}$	$0.35/\sqrt{L}$
$\sqrt{D_M}$	$0.71 \cdot 10^{-1}$	$0.98 \cdot 10^{-1}$	$0.29 \cdot 10^{-1}$	$0.73 \cdot 10^{-1}$	$0.59 \cdot 10^{-2}$	$0.45 \cdot 10^{-1}$
D	$0.27 \cdot 10^{-1}$	$0.81 \cdot 10^{-2}$	$0.27 \cdot 10^{-2}$	$0.11 \cdot 10^{-1}$	$0.75 \cdot 10^{-3}$	$0.07/\sqrt{L}$
$\sqrt{D_D}$	0.34	$0.35 \cdot 10^{-1}$	$0.19 \cdot 10^{-1}$	$0.66 \cdot 10^{-2}$	$0.84 \cdot 10^{-2}$	$0.62 \cdot 10^{-1}$
U_{\max}	$3.1/\sqrt{L}$	$3/\sqrt{L}$	$3.8/\sqrt{L}$	$3.2/\sqrt{L}$	$3.1/\sqrt{L}$	$3.4/\sqrt{L}$
$\sqrt{D_{U_{\max}}}$	$0.61 \cdot 10^{-1}$	$0.67 \cdot 10^{-1}$	$0.68 \cdot 10^{-1}$	$0.66 \cdot 10^{-1}$	$0.61 \cdot 10^{-2}$	$0.21 \cdot 10^{-1}$

Таблица 3. Статистические характеристики ПФВК производных ортогональных последовательностей

Параметры ПФВК	Число элементов в сигнале					Усредненные значения
	16	60	256	508	1020	
M	$3.8 \cdot 10^{-2}$	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$0.35 \cdot 10^{-1}$	$0.25 \cdot 10^{-1}$	$0.367/\sqrt{L}$
$\sqrt{D_M}$	$7.5 \cdot 10^{-5}$	$0.5 \cdot 10^{-4}$	$8.7 \cdot 10^{-6}$	$0.9 \cdot 10^{-3}$	$0.69 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$
D	$5.6 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$0.71 \cdot 10^{-3}$	$0.36 \cdot 10^{-3}$	$0.12/\sqrt{L}$
$\sqrt{D_D}$	$0.4 \cdot 10^{-1}$	$6.4 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$0.64 \cdot 10^{-3}$	$0.57 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-6}$
U_{\max}	0.38	0.33	0.19	$3.2/\sqrt{L}$	$3.8/\sqrt{L}$	$(1/3)/\sqrt{L}$
$\sqrt{D_{U_{\max}}}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$0.85 \cdot 10^{-1}$	$0.77 \cdot 10^{-1}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$

ней графе таблиц приведены усредненные значения статистических характеристик ПФВК.

Анализ табл. 1—3 показывает, что нормированные значения ПФВК характеристических и производных ортогональных систем сигналов не уступают значениям ПФВК ЛРПМ, но, как будет показано ниже, обладают значительно лучшими ансамблевыми характеристиками. Следовательно, использование характеристических и производных ортогональных систем сигналов в командно-телеметрических радиоприемниках не приведет к снижению помехозащищенности командно-телеметрических радиоприемников. В то же время, как показано в работах Варакина (1985) и Горбенко (1989), характеристические последовательности являются оптимальными по апериодическим функциям корреляции, что повышает качество функционирования систем измерения дальности и скорости.

АНАЛИЗ ИМИТОСТОЙКОСТИ КОМАНДНО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛИНИИ

При построении командно-телеметрической радиоприемной разработчикам приходится решать не только проблему помехозащищенности, но и проблему имитостойкости.

Проблема имитостойкости командно-телеметрической радиоприемной в настоящее время решается на

основе криптографического преобразования дискретной информации с использованием специальной аппаратуры. Используемые алгоритмы базируются на вводе в информационные пакеты дополнительной избыточной информации, способной обнаружить попытки навязывания ложных сообщений и обеспечивают пассивную имитозащиту, основанную на отказе от принимаемой информации, если в принятом сообщении имеются ошибки. В ряде случаев, как показали исследования (Тузов и др., 1993), это приводит к срывам в сеансах связи. Учитывая, что в условиях лимита времени отказ от информации влечет невыполнение ряда программ, проблему имитостойкости необходимо решать не на дискретном, а на физическом уровне (Горбенко и др., 1996; Горбенко, Стасев, 1996). Так, реализация алгоритма имитозащиты на физическом уровне системы «Milstar» позволила снизить требования к помехозащищенности командно-телеметрической радиоприемной. В работе Горбенко и Стасева (1996) показано, что обеспечить требуемую имитостойкость на физическом уровне возможно при реализации в радиоприемной динамической смены форм сложных сигналов. В этом случае наряду с корреляционными свойствами используемых сигналов важное значение приобретают и ансамблевые характеристики сигналов.

В табл. 4 приведены ансамблевые характеристики ЛРПМ характеристических и производных орто-

Таблица 4. Ансамблевые характеристики сигналов

Система сигналов	L									
	15	16	63	60	255	256	511	508	1023	1020
ЛРПМ	2		8		16		48		60	
Характеристические последовательности		8		20		128		252		256
Производные ортогональные последовательности		16		$4.6 \cdot 10^3$		$1.5 \cdot 10^7$		$6.3 \cdot 10^7$		10^8

гональных последовательностей. Данные табл. 4 свидетельствуют, что характеристические и производные ортогональные последовательности существенно превосходят по ансамблевым характеристикам линейные рекуррентные последовательности, что позволяет решить проблему имитостойкости командно-телеметрической радиолинии на физическом уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ свойств сложных сигналов показал, что характеристические и производные ортогональные последовательности позволяют решить в комплексе проблему помехозащищенности и имитостойкости командно-телеметрических радиолиний на физическом уровне. Использование этих систем сигналов и реализация алгоритмов динамической смены форм сложных сигналов обеспечит активную имито- и помехозащиту командно-телеметрических радиолиний.

Варакин Л. Е., Власов В. В. Анализ воздействия мощной структурной помехи на радиотехническую систему с шумоподобными сигналами // Радиотехника и электроника.— 1983,—28, № 6.—С. 1094—1101.

Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985.—384 с.

Горбенко И. Д. Новые алгоритмы синтеза оптимальных дискретных сигналов // Радиотехника и электроника.—1989.—34, № 11.—С. 2352—2357.

Горбенко И. Д., Долгов В. И., Стасев Ю. В., Троцило А. С. Новый подход в обеспечении безопасности информации при проведении совместных международных космических программ // 4-й Украинско-российско-китайский симпозиум. — Киев, 1996.—С. 680—684.

Горбенко И. Д., Стасев Ю. В. Безопасность информации в космических системах связи и управления // Косміч. наука і технологія.—1996.—2, № 5—6.—С. 24—28.

Пестряков В. Б. (ред.) Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. — М.: Сов. Радио, 1973.—243 с.

Стасев Ю. В., Пастухов Н. В. Производные ортогональные сигналы и их свойства // Косміч. наука і технологія.— 1996.—2, № 5—6.—С. 9—16.

Тузов Г. И., Урядников Ю. Ф., Прытков В. И. и др. Адресные системы управления и связи. Вопросы оптимизации. — М.: Радио и связь, 1993.—384 с.

Spilker J. J. GPS signal structure and performance characteristics // Navigation.—1978.—25, N 2.—P. 121—146.

COMPLEX SIGNALS IN COMMAND RADIO TELEMETERING

U. V. Stasev, I. D. Gorbenko, B. I. Makarenko,
A. V. Ivashkin, and D. N. Voronov

We analyze algorithms for constructing complex signals and study the properties of the signals. We analyze also electronic anticountermeasures and simulation resistance of command radio telemetering different systems of complex signals.